

LIBRO INTERACTIVO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

**GUILLERMO LEÓN MARTINEZ ARIAS
JAVIER ALEXANDER LOPEZ HINCAPIÉ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA**

2008

LIBRO INTERACTIVO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

**GUILLERMO LEÓN MARTINEZ ARIAS
JAVIER ALEXANDER LOPEZ HINCAPIÉ**

**PROYECTO DE GRADO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO ELECTRICISTA**

**DIRECTOR
FABIO ANTONIO OCAMPO MUÑOZ
INGENIERO ELECTRICISTA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA**

2008

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma director proyecto de grado

“A mis hermanas que siempre fueron mi apoyo en los momentos difíciles, pero en especial a mis padres que a pesar de la distancia siempre me hicieron sentir que los tenía ahí a mi lado para enfrentar las dificultades que se presentasen. A todos ellos les doy gracias por que sin su apoyo no hubiera logrado alcanzar esta meta tan importante en mi vida”.

Guillermo León

A Dios fuente de toda mi vida, a mis padres Javier López y Yolanda Inés Hincapié por su amor, dedicación, paciencia y ejemplo en mi formación, a mi hermana Yeimy Tatiana por su apoyo y ánimo en los momentos difíciles.

Javier Alexander

CONTENIDO

Pág

INTRODUCCIÓN	
OBJETIVOS	
OBJETIVO GENERAL	
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
1. MODELOS PEDAGÓGICOS	11
1.1 PERSPECTIVAS Y MODELOS PEDAGÓGICOS	11
1.2 EL MODELO PEDAGÓGICO TRADICIONAL	12
1.3 EL MODELO PEDAGÓGICO ROMÁNICO	14
1.4 EL MODELO PEDAGÓGICO CONDUCTISTA	14
1.5 EL MODELO PEDAGÓGICO SOCIAL-COGNITIVO	17
1.6 LA PERSPECTIVA PEDAGÓGICA COGNITIVA (constructivista)	20
1.7 APLICACIÓN DEL CONSTRUCTIVISMO EN LA ENSEÑANZA DE LA TECNOLOGÍA	24
1.7.1 Características de la enseñanza a través de la tecnología	24
2. MÁQUINAS SÍNCRONAS	27
2.1 DEFINICIÓN	27
2.2 MOTOR ELÉCTRICO	27
2.3 GENERADOR ELÉCTRICO	27
2.4 UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS	28
2.4.1 La máquina síncrona, con un inducido móvil (rotor) y un inductor fijo (estator)	28
2.4.2 La máquina síncrona, con un Inductor móvil (rotor) e Inducido fijo (estator)	28
2.5 CONSTRUCCIÓN	30
2.6 CAMPO GIRATORIO	31
2.7 VOLTAJE INDUCIDO (Eg)	34
2.8 DEVANADOS DEL INDUCIDO EN LA MÁQUINA SÍNCRONA	35
2.8.1 Factor de Paso	37
2.8.2 Factor de distribución	40
2.9 RESUMEN DE ECUACIONES	42
3. GENERADOR SÍNCRONO	42
3.1 INTRODUCCIÓN	42
3.2 CONSTRUCCIÓN	44
3.2.1 Estator	46
3.2.2 Rotor	47
3.2.3 Jaula Amortiguadora	47
3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO	48
3.4 POTENCIA EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS	52
3.5 MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DEL GENERADOR SÍNCRONO	54
3.5.1 La resistencia del inducido o armadura	54
3.5.2 La impedancia síncrona	55
3.5.3 La reactancia síncrona	58
3.6 DIAGRAMA FASORIAL DE UN GENERADOR SÍNCRONO	59
3.6.1 Diagrama de fase con factor de potencia unitario	59
3.6.2 Diagrama de fase con factor de potencia en atraso	59
3.6.3 Diagrama de fase con factor de potencia en adelanto	59
3.7 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO	60

3.8 RESUMEN ECUACIONES	61
4. MOTOR SÍNCRONO	62
4.1 INTRODUCCIÓN	62
4.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	62
4.3 CIRCUITO EQUIVALENTE	63
4.4 DIAGRAMA DE FASE	64
4.5 EFECTO DE LA CARGA EN LOS MOTORES SÍNCRONOS	65
4.6 CURVA CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD	66
4.7 CURVAS EN “V”	67
4.8 ARRANQUE DE LOS MOTORES SÍNCRONOS	70
4.8.1 Reduciendo la frecuencia eléctrica	70
4.8.2 Mediante un motor primario externo	71
4.8.3 Utilizando devanados de amortiguación	71
4.9 CONDENSADORES SÍNCRONOS	72
4.10 APLICACIÓN DE LOS MOTORES SÍNCRONOS	73
4.10.1 Ventajas de los motores síncronos	73
4.10.2 Desventajas de los motores síncronos	73
4.11 RESUMEN DE ECUACIONES	74
5 GENERADORES EN PARALELO	75
5.1 INTRODUCCIÓN	75
5.2 CONDICIONES REQUERIDAS PARA EL FUNCIONAMIENTO EN PARALELO	75
5.3 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA CONECTAR GENERADORES EN PARALELO	77
5.4 EL METODO DE LAS TRES LÁMPARAS APAGADAS	79
5.5 EL METODO DE LAS DOS LÁMPARAS ENCENDIDAS Y UNA APAGADA	80
5.6 CARACTERÍSTICA DE FRECUENCIA-POTENCIA Y DE VOLTAJE-POTENCIA REACTIVA EN UN GENERADOR SÍNCRONO	81
5.7 OPERACIÓN DE GENERADORES EN PARALELO CON GRANDES SISTEMAS DE POTENCIA	84
5.8 OPERACIÓN DE GENERADORES EN PARALELO CON OTROS GENERADORES DEL MISMO TAMAÑO	89
5.9 RESUMEN DE ECUACIONES	95
6 MANEJO DEL LIBRO INTERACTIVO	96
6.1 DESCRIPCIÓN DEL LIBRO INTERACTIVO	96
6.1.1 Según los contenidos	96
6.1.2 Según los destinatarios	96
6.1.3 Según su estructura	96
6.1.4 Según su base de datos	96
6.1.5 Según los medios que integra	96
6.1.6 Según los objetivos educativos que pretende facilitar	96
6.1.7 Según las actividades cognitivas que activa	96
6.1.8 Según su comportamiento	97
6.1.9 Según su diseño	97
6.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS	97
6.3 MODO DE EMPLEO	97
CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFIA	

INDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Máquina síncrona, con Inducido móvil e Inductor fijo	29
Figura 2. Máquina síncrona, con Inductor móvil e Inducido fijo	29
Figura 3. Partes Constructivas de la máquina síncrona.	30
Figura 4. Campo Resultante en $t=0$.	32
Figura 5. Campo Resultante en $\omega t=90^\circ$	32
Figura 6. Campo Resultante en $\omega t=135^\circ$	33
Figura 7. Campo Resultante en $t=180^\circ$	33
Figura 8. Bobinado máquina síncrona	35
Figura 9. Interconexión Grupos	36
Figura 10. Voltaje de bobina diametral	38
Figura 11. Voltaje de bobina con paso fraccional	38
Figura 12. Factor de distribución	39
Figura 13. Rotor Polos Salientes	43
Figura 14. Rotor Polos no Salientes	43
Figura 15. Tipos de Carcasas	45
Figura 16. Núcleo de Armadura	46
Figura 17. Flecha	46
Figura 18. Rodamientos	47
Figura 19. Jaula amortiguadora	47
Figura 20. Circuito equivalente Generador Síncrono en Y	49
Figura 21. Circuito equivalente Generador Síncrono en Δ	49
Figura 22. Circuito Equivalente por fase del Generador Síncrono	50
Figura 23. Circuito en términos de impedancias	51
Figura 24. Diagrama de pérdidas de potencia	52
Figura 25. Esquema medición resistencia inducido en Y	55
Figura 26. Esquema medición resistencia inducido en Δ	55
Figura 27. Esquema prueba en vacío	57
Figura 28. Curva característica prueba en vacío	57
Figura 29. Esquema prueba cortocircuito	57
Figura 30. Curva característica. Prueba a cortocircuito	58
Figura 31. Curva característica. Prueba en vacío vs prueba a cortocircuito	58
Figura 32. Diagrama de fase con FP=1	59
Figura 33. Diagrama de fase con FP en atraso	60
Figura 34. Diagrama de fase con FP en adelanto	60
Figura 35. Motor síncrono de dos polos	63
Figura 36. Circuito equivalente por fase del Motor síncrono	64
Figura 37. Diagramas fasoriales Motor síncrono	64
Figura 38. Diagrama vectorial Motor Síncrono	66
Figura 39. Curva Característica Par vs Velocidad	65
Figura 40. Esquema Curvas en V	67
Figura 41. Curvas Características en V	68
Figura 42. Esquema Arranque motor Síncrono	69
Figura 43. Generadores en Paralelo	72
Figura 44. Secuencia de Fase	76
Figura 45. Generadores en Paralelo	77
Figura 46. Sincronoscopio	78
Figura 47. Esquema Método de las tres Lámparas Apagadas	78

Figura 48. Esquema Método de las dos Lámparas encendidas y una apagada	79
Figura 49. Diagrama en estrella	80
Figura 50. Característica Velocidad vs Potencia	81
Figura 51. Característica Frecuencia vs Potencia	82
Figura 52. Característica Voltaje de fase vs Potencia Reactiva	82
Figura 53. Característica Frecuencia vs Potencia	83
Figura 54. Curva Característica Voltaje vs Potencia	85
Figura 55. Generadores en Paralelo	85
Figura 56. Diagrama de Casa	86
Figura 57. Diagrama Frecuencia vs Potencia después de conexión en Paralelo	86
Figura 58. Diagrama Frecuencia vs Potencia	87
Figura 59. Diagrama de casa	87
Figura 60. Diagrama Fasorial	88
Figura 61. Generadores en Paralelo	89
Figura 62. Diagrama Frecuencia vs Potencia	90
Figura 63. Diagrama Frecuencia vs Potencia	91
Figura 64. Voltaje vs Potencia reactiva	91
Figura 65. Frecuencia vs Potencia	92
Figura 66. Frecuencia vs Potencia	93
Figura 67. Página de entrada	94
Figura 68. Primeros enlaces	98
Figura 69. Página principal	98
Figura 70. Campo #1	99
Figura 71. Campo #2	99
Figura 72. Campo #3	100
Figura 73. Plantilla principal	100
Figura 74. Página con base de datos	101
Figura 75. Otros botones	102

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación propone un libro interactivo sobre máquinas síncronas con fines didácticos. Busca mejorar la enseñanza y el aprendizaje en la asignatura de máquinas eléctricas en la escuela de tecnología eléctrica de la UTP, dado que en ella predomina un modelo de enseñanza tradicional. El programa fue concebido dentro del enfoque pedagógico constructivista y por ello propone una activa participación de los estudiantes. Elaborado a partir de la herramienta de diseño Macromedia flash mx 2004, combina aplicaciones de Couldfusion, Photoshop, Dreamweaver, frenad mx, Microsoft Publisher, Microsoft Powerpoint, cuyos resultados son imágenes interactivas, fotografías, esquemas, ecuaciones, conceptos, gráficos y ejercicios que posibilitan el aprendizaje significativo. El proyecto consta de un texto y un libro interactivo, en formato de CD. El libro interactivo se divide en cuatro capítulos: máquinas síncronas, generadores síncronos, motores síncronos, generadores en paralelo, además de un apartado de ejercicios, y una base de datos que contiene direcciones web, las cuales permiten profundizar en los temas mencionados. El presente informe contiene dos capítulos más, uno denominado modelos pedagógicos, y otro manejo CD interactivo.

En el primer capítulo denominado modelos pedagógicos, se enuncian diferentes temas en cuanto a sistemas de enseñanza; entre los cuales se tiene el modelo tradicional, romántico, conductista, social-cognitivo, aplicaciones. En el segundo capítulo se enuncian conceptos generales como, máquina síncrona, motor, generador, ubicación de estructuras, construcción, campo giratorio, devanados, voltaje inducido. En el tercer capítulo, se muestra una descripción detallada del generador síncrono en donde se plantean temas como: construcción, circuito equivalente, potencias, medición parámetros internos, diagramas de fase y velocidad. El cuarto capítulo muestra una descripción detallada del motor síncrono en donde se plantean temas como: principio de operación, circuito equivalente, diagrama de fase, efectos de carga, curvas en V, condensadores, aplicaciones. En el quinto capítulo se habla de generadores en paralelo, los cuáles son encontrados en las centrales de generación; se tratan temas como: condiciones para el funcionamiento en paralelo, procedimiento para conexiones en paralelo, métodos para conectar en paralelo, características en frecuencia, voltaje, potencia. El sexto capítulo denominado manejo CD interactivo, el cual enseña como instalar el CD interactivo, su manejo, sus funciones y aplicaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y producir un libro interactivo de máquinas síncronas como herramienta pedagógica para los docentes y método de estudio para los estudiantes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las diferentes herramientas de diseño web, para la realización de texto, animaciones, edición fotográficas, etc.
- Estudiar los diferentes métodos pedagógicos para una enseñanza interactiva.
- Recopilar y clasificar bibliografía sobre máquinas síncronas.
- Aplicar las herramientas de diseño en la edición del libro interactivo.

1. MODELOS PEDAGÓGICOS

1.1 PERSPECTIVAS Y MODELOS PEDAGÓGICOS

Un modelo es una herramienta conceptual para entender mejor un evento; es la representación del conjunto de relaciones que describen un fenómeno. Un modelo pedagógico es la representación de las relaciones que predominan en el acto de enseñar; es también un paradigma que puede coexistir con otros y que sirve para organizar la búsqueda de nuevos conocimientos en el campo de la pedagogía.

Toda teoría pedagógica trata de responder de manera sistemática y coherente al menos estas preguntas: ¿Qué tipo de ser humano se quiere formar?, ¿Con qué experiencias crece y se desarrolla un ser humano?, ¿quién debe impulsar el proceso educativo?, ¿Con qué métodos y técnicas puede alcanzarse mayor eficacia? Diferentes especialistas podrían responder una sola de estas preguntas, pero la especialidad del pedagogo es abordarlas todas de forma transdisciplinaria.

Aunque en el fondo siempre se encuentra la formación como concepto clave y unificador de toda pedagogía, a continuación se proponen cinco criterios de elegibilidad que permiten distinguir una teoría pedagógica, de otra que no lo es:

- a. Definir el concepto de ser humano que se pretende formar, o la meta esencial de formación humana.
- b. Caracterizar el proceso de formación del ser humano, en el desarrollo de las dimensiones constitutivas de la formación, en su dinámica y secuencia.
- c. Describir el tipo de experiencias educativas que se privilegian para afianzar el impulsar el proceso de desarrollo, incluyendo los contenidos curriculares.
- d. Describir las regulaciones que permiten cualificar las interacciones entre el educando y el educador en la perspectiva del logro de las metas de formación.
- e. Describir y prescribir métodos y técnicas de enseñanza que pueden utilizarse en la práctica educativa como modelos de acción eficaces.

Toda teoría pedagógica desarrolla estos cinco parámetros o criterios de elegibilidad de manera coherente y sistemática, como respuesta a las cinco preguntas esenciales que se han formulado los pedagogos de todos los tiempos: ¿En qué sentido se humaniza un individuo?, ¿Cómo se desarrolla este proceso de humanización?, ¿Con qué experiencias?, ¿Con qué técnicas y métodos?, y ¿Cómo se regula la interacción maestro-alumno? Comprendido esto se está en capacidad de distinguir una teoría pedagógica de una psicología, sociología, lingüística, o de la comunicación; aunque estas últimas se ocupan en ocasiones de fenómenos educativos o de aprendizaje, ello no las hace pedagógicas, pues la esencia del hecho educativo es la interacción simultánea de los cinco parámetros citados.

Los modelos que representan las perspectivas teóricas de mayor difusión e importancia contemporánea (FLOREZ, 1995) y las formas y técnicas de evaluación educativa que de ellas se derivan, se actualizan a continuación.

1.2 EL MODELO PEDAGÓGICO TRADICIONAL

En su forma más clásica, este modelo enfatiza en la formación del carácter de los estudiantes para moldear, a través de la voluntad, la virtud y el rigor de la disciplina, el ideal humanístico y ético. Recoge la tradición metafísico-religiosa medieval. En este modelo el método y el contenido de la enseñanza en cierta forma se confunden con la limitación del buen ejemplo del ideal propuesto como patrón, cuya encarnación más próxima se manifiesta en el maestro. Se preconiza el cultivo de las facultades del alma: entendimiento, memoria y voluntad y una visión indiferenciada e ingenua de la transferencia del dominio logrado en disciplinas clásicas como el latín o las matemáticas.

El método básico de aprendizaje es el academicista, verbalista, que dicta sus clases bajo un régimen de disciplina con unos estudiantes que son básicamente receptores. La ilustración ejemplar de este método es la forma como los niños aprenden la lengua materna: oyendo, observando y repitiendo muchas veces. Es así como el niño adquiere la herencia cultural de la sociedad, representada en el maestro como la autoridad.

En la primera mitad del siglo XX el enfoque transmisionista tradicional predominó en las escuelas luego de superar el ilusorio concepto de disciplina formal que prometía una facultad intelectual general, única y homogénea para pensar y resolver cualquier problema. Desde la segunda mitad del siglo XX se abrió a la enseñanza convencional de los conceptos y estructuras básicas de las diferentes disciplinas como una manera de integrar la nueva generación a la cultura de la sociedad moderna, y de asegurar la continuidad de la herencia de la civilización occidental. La materia de estudio en esta perspectiva abarca no sólo información y conceptos básicos de la ciencia y la cultura sino también valores básicos de convivencia para la socialización de los niños y su preparación para el trabajo. La escuela básica primaria obligatoria se centró en la transmisión de las habilidades o competencias básicas mínimas de comunicación y cálculo, para que los alumnos aprendieran a defenderse en la vida social.

El énfasis de la enseñanza transmisionista en contenidos de las ciencias, ya producidos, se ha visto fortalecido en las últimas décadas por la activa participación de profesores y especialistas universitarias en la definición y ejecución de planes de enseñanza y de currículos más científicos, centrados en la exposición magistral de conocimientos específicos más actuales que permiten preparar a los jóvenes en los avances científico-técnicos, sobretodo en la enseñanza de ciencias naturales y matemáticas.

Max Beberían mostró en la década de los años 50 que ingenieros y matemáticos podían enseñar con éxito teoría de conjuntos en la escuela de secundaria de la universidad de Illinois. Y J. Zacharias, en la misma época, con un grupo de físicos del Mit y de Harvard hizo ensayos parecidos en otros colegios de secundaria, en temas de física que permitieran a Estados Unidos recuperar la delantera de la educación científica de la juventud, que habían perdido con el lanzamiento del Sputnik al espacio por parte de la Unión Soviética (ATKIN y HOUSE, 1981). Naturalmente, la enseñanza de las ciencias por parte de ingenieros, físicos y matemáticos se centraba en contenidos ya elaborados, y su misión era transmitirlos de la manera más fiel y actualizada posible, para contrarrestar los, según ellos, deficientes maestros egresados de las facultades de educación que enseñaban ciencias sin dominarlas suficientemente. Por supuesto, los pedagogos más avanzados criticaron a los universitarios transmisionistas por no saber ni preocuparse por el cómo del

aprendizaje y se inició la polémica acerca de quién debería enseñar, si los científicos o los pedagogos.

Hay que destacar que en la enseñanza transmisionista tradicional la evaluación de los alumnos es un procedimiento que se utiliza casi siempre al final de la unidad o del periodo lectivo para detectar si el aprendizaje se produjo y decidir si el alumno repite el curso o es promovido al siguiente. Se trata de una evaluación final o sumativa, externa a la enseñanza misma y que permite verificar el aprendizaje de los alumnos de manera cualitativa, simplemente comprobando si el alumno aprendió o no el conocimiento transmitido; o de manera cuantitativa asignándole algún numeral o porcentaje al aprendizaje que el alumno muestra en relación con el promedio del grupo al que pertenece (evaluación según norma) o en relación con la precisión del logro del objetivo de aprendizaje esperado o enseñado (evaluación según criterio).

En la enseñanza tradicional los profesores también hacen preguntas evaluativas espontáneas durante el desarrollo de la clase, para chequear no sólo la atención de los estudiantes a la lección correspondiente, sino el grado de comprensión a las explicaciones que el profesor está desarrollando en la clase. Éste tipo de evaluación diagnóstica permite además saber si el alumno está preparado para entender el tema siguiente, a fin de prevenir, corregir y ajustar la clase, y ofrecer actividades remediales.

En la enseñanza tradicional la evaluación es reproductora de conocimientos, clasificaciones, explicaciones y argumentos previamente estudiadas por el alumno en notas de clase o textos prefijados, sin que ello signifique repetición memorísticas, pues también se evalúan en esta perspectiva tradicional niveles y habilidades de comprensión, análisis, síntesis y valoración de lo estudiado, ya sea en pruebas orales o en pruebas escritas de preguntas abiertas. Las preguntas escritas pueden ser también cerradas o de una respuesta precisa, tipo test, llamadas también preguntas objetivas y pueden redactarse de diferentes formas según requieran del estudiante información o comprensión y reflexión sobre el tema objeto del examen. Pueden ser de la forma de respuesta corta, de ordenación, de selección múltiple, de escogencia de la mejor respuesta, de interpretación de un texto o situación, o de solución de problemas siguiendo cierta pauta o algoritmo. Pero estas pruebas objetivas, aplicadas al final de una enseñanza tradicional, tiene la dificultad de que no encajen ni corresponden a una enseñanza verbalista, ambigua y espontánea que caracteriza a la pedagogía tradicional.

Hay que aclarar que en esta perspectiva pedagógica, la responsabilidad principal del aprendizaje se carga sobre el alumno, de su esfuerzo depende su aprendizaje, de ahí que es al alumno al que hay que evaluar y no al maestro. Con frecuencia, en este modelo tradicional de enseñanza, los alumnos aprenden no por mérito de su profesor, sino, a veces, a pesar del profesor.

El texto escolar, guía obligatoria de la materia, despliega los contenidos necesarios para el desarrollo de la materia, a la manera de una exposición magistral; es generalmente ordenado, sólido, con ilustraciones y ejemplos didácticos, e incluso aplicaciones y ejercicios recomendados a los alumnos.

Se trata de una exposición convencional completa y lineal de la temática de la material, de los conocimientos básicos ya producidos y definidos, que sólo esperan ser asimilados por el alumno gracias a una presentación clara, diagramada y que sigue el orden y secuencia de la disciplina.

El currículo en este modelo pedagógico es un plan general de contenidos, no operacionalizados ni objetivados, que permite márgenes tan grandes de interpretación al profesor en su ejecución, que mientras no se salga del marco general ni de su papel de organizador tradicional dentro del aula, puede generar brechas considerables entre el currículo oficial y el real, sin que las instituciones sepan ni se preocupen, pues en ellas muchos de sus supuestos teóricos son implícitos, o permanecen inscritos como declaraciones formales, abstractas y generales.

1.3 EL MODELO PEDAGÓGICO ROMÁNTICO (experiencial o naturalista)

Este modelo pedagógico sostiene que el contenido más importante del desarrollo del niño es lo que procede de su interior y, por consiguiente, el centro, el eje de la educación es el interior del niño. El ambiente pedagógico debe ser muy flexible para que el niño despliegue su interioridad, sus cualidades y sus habilidades naturales en maduración y se proteja de lo inhibitorio y nada auténtico que proviene del exterior cuando se le inculcan o transmiten conocimientos que pueden violar su espontaneidad. El desarrollo natural del niño se convierte en la meta y a la vez en el método de la educación.

El maestro debe liberarse, él mismo, de los fetiches del alfabeto, de las tablas de multiplicar y de la disciplina y ser sólo un auxiliar o un amigo de la expresión libre, original y espontánea de los niños.

El ideólogo de este modelo es Jean Jacques Rousseau, y en el siglo XX se destacaron L.Lich y A.S. Neil, el pedagogo de Summerhill.

A diferencia del modelo tradicional, en este enfoque no interesa el contenido del aprendizaje ni el tipo de saber enseñado, pues lo que cuenta es el desenvolvimiento espontáneo del niño en su experiencia natural con el mundo que lo rodea, bajo la metáfora biológica de la semilla que lleva adentro sus potencialidades para crecer y desarrollarse hasta convertirse en adulto. Sus experiencias vitales espontáneas, por oposición al cultivo de la razón y de la libertad racional ilustrada, tienen valor intrínseco, no son un medio ni un instrumento para lograr ningún objetivo, ni ninguna meta educativa o etapa de desarrollo; la experiencia del niño es por sí misma valiosa, no necesita ponerse a prueba, no remite a nada fuera de sí misma, no necesita confirmarse, ni refutarse, ni evaluarse, ni controlarse, pues no tiene pretensión de verdad. Su verdad es su autenticidad misma.

En ello consiste precisamente el puerocentrismo que caracteriza y da el nombre a esta perspectiva, en la no interferencia de los adultos que la dictan, enseñan, programan, disciplinan, imponen y evalúan, contaminando la experiencia pristina y original de la vida natural del niño en desarrollo, que no requiere en absoluto ser condicionado por los maestros, sino respetado en su sensibilidad, en su curiosidad exploratoria, en su creatividad y comunicabilidad natural, y cuando lo solicite, apoyado. En este modelo pedagógico el centro de la educación es sólo el niño.

1.4. EL MODELO PEDAGÓGICO CONDUCTISTA

Este modelo se desarrolló paralelamente con la creciente racionalización y planeación económica de los recursos en la fase superior del capitalismo, bajo la mira del moldeamiento metódico de la conducta productiva de los individuos. El método es en

esencia, el de la fijación y control de los objetivos instruccionales formulados con precisión y reforzados en forma minuciosa. Adquirir conocimientos, códigos impersonales, destrezas y competencias bajo la forma de conductas observables, es equivalente al desarrollo intelectual de los niños. Se trata de una transmisión parcelada de saberes técnicos mediante un adiestramiento experimental que utiliza la tecnología educativa. El mas destacado promotor y exponente de este modelo es Burrhus Frederic Skinner.

Aunque esta perspectiva pedagógica conserva la importancia de transmitir el contenido científico-técnico a los aprendices como objeto de la enseñanza, según lo pregona el modelo tradicional, no obstante, los conductistas enfatizan también en la necesidad de atender las formas de adquisición y las condiciones del aprendizaje de los estudiantes (GAGNE, 1971). Es decir, los educadores para ser eficientes deberán traducir los contenidos en términos de los que los estudiantes sean capaces de hacer, de las conductas que tengan que exhibir como evidencia de que afectivamente el aprendizaje se produjo. En el fondo se trata de un camino pedagógico para tecnificar y volver mas eficiente y objetiva la enseñanza transmissionista tradicional; para ello, lo primero que tiene que lograr el educador es expresar con precisión lo que espera que el estudiante aprenda en términos de comportamiento observable, de modo que mientras no domine el aprendizaje previo, no pueda continuar en el curso. Fue Mager, R (1962) quien diseñó un procedimiento sencillo redactado con tres elementos básicos, para que los maestros aprendieran a formular objetivos específicos de instrucción:

- Descripción del comportamiento que el estudiante adquirirá o exhibirá.
- Definición de las condiciones de tiempo, de espacio, de elementos intervinientes, de restricciones, etc., bajo las cuales el comportamiento ocurrirá. Esto hace observable el objetivo.
- Evaluación y verificación del criterio de desempeño aceptable.

De hecho, todos los manuales que enseñan a planificar la instrucción recomiendan empezar por definir los objetivos específicos que aseguren con exactitud lo que los alumnos pueden lograr en el entrenamiento y la manera de verificarlos en forma práctica bajo ciertas condiciones y dentro de cierto y margen de error preestablecido. Tan importante es eliminar la vaguedad del objetivo de aprendizaje buscado que Mager llegó, incluso, a indicar los verbos que no expresan con precisión la intención del educador (saber, entender, comprender, apreciar, captar, creer) porque se prestan a diversas interpretaciones, mientras otros verbos describen mejor la conducta que se espera del aprendiz: escribir, identificar, resolver, construir, enumerar, comparar, etcétera.

Si un curso y todo el currículo conductista no es más que un conjunto de objetivos terminales expresados en forma observable y medible, a los que el estudiante tendrá que llegar desde cierto punto de partida o conducta de entrada, mediante el impulso de ciertas actividades, medios, estímulos y refuerzos secuenciados y meticulosamente programados, se comprende entonces que la enseñanza conductista sea un proceso de evaluación y control permanente, arraigado en la esencia de lo que es un objetivo instruccional.

En la perspectiva conductista, definido el programa instruccional, evaluar no es diferente a enseñar, pues suprimida la subjetividad aleatoria y sesgada del maestro en los objetivos específicos, su función se reduce a verificar el programa, a constituirse en

un controlador que refuerza la conducta esperada y autoriza el paso siguiente a la nueva conducta o aprendizaje previsto, y así sucesivamente. Los objetivos instruccionales son los que guían la enseñanza, son ellos lo que indican lo que debe hacer el aprendiz, por esto a los profesores le corresponde sólo el papel de evaluadores, de controladores de calidad, de administradores de los refuerzos.

El refuerzo es precisamente el paso que afianza, asegura y garantiza el aprendizaje. Dado un estímulo (o un problema) y presentado un modelo de respuesta adecuado, el estudiante debe recibir del profesor la aceptación, el premio (o la nota), es decir, el refuerzo, cuando logre reproducir la solución correcta o la respuesta modelada para problemas similares, bajo las condiciones observables y medibles previstas en el objetivo instruccional. El refuerzo es el autorregulador, el retroalimentador del aprendizaje que permiten saber a los estudiantes si acertaron o no, si lograron la competencia y el dominio del objetivo con la calidad que se esperaba. Mientras el refuerzo no ocurra, los estudiantes tendrán que ocuparse de observar, informarse y reparar en los elementos que contiene el objetivo instruccional, que es precisamente la respuesta moldeada que tienen que ensayar, practicar y ajustar hasta lograr producirla con la perfección prevista; y es el profesor quien la acepta y la refuerza.

En este sentido, la evaluación hace parte esencial de la enseñanza conductista, en cuanto el profesor refuerza y define el aprendizaje. Pero el mismo profesor no es tan imprescindible. Su papel puede ser objetivado en los materiales de instrucción, de forma que sean los mismos materiales escritos los que guíen la organización, dirección y la enseñanza del alumno, de manera que el desarrollo total del curso ocurra sin la intervención directa del profesor, pues el refuerzo podría programarse y otorgarse por escrito; desmenuzando las actividades del alumno en tareas más sencillas, graduando los niveles de dificultad, enseñando una sola destreza por tarea y asegurando pautas, correcciones y retroalimentaciones después de cada logro. Los materiales de autoinstrucción pueden programarse para que sustituyan al profesor, sobre todo ahora, con la disponibilidad del computador personal.

En la autoinstrucción, la evaluación y el refuerzo retroalimentador siguen siendo definitivos. Los exámenes de unidad y de curso tendrán que reflejar lo estudiado, sin discriminar que sean pruebas verbales o de ejecución práctica, pues todas han de ser objetivas y de respuesta precisa. Una buena instrucción conductista requiere prever y diseñar por anticipado los instrumentos de evaluación.

Si los maestros encuentran dificultades para lograr una acertada rigurosa aplicación de los principios de aprendizaje con enfoque conductista al aula de clase, en cursos técnicos o de entrenamientos en destrezas específicas (dominio de movimientos deportivos, manejo de máquinas y de herramientas, aprendizaje de idiomas extranjeros, etc.), donde pueden definirse tareas y competencias operacionales en términos de conductas observables, mayor será la dificultad para aplicar con éxito tales principios del aprendizaje conductista a metas y objetivos educativos más complejos que no se prestan al análisis de tareas y menos a la observación, la medición y el control experimental.

El logro de aprendizajes complejos ocurre al interior del sujeto que aprende y se alcanza bajo la forma de un proceso de reestructuración conceptual, de una recontextualización interior, de un nuevo horizonte de sentido que arroja nuevas luces sobre la manera de abordar la vida y las decisiones libres que hay que asumir en ella, sin que el observador conductual pueda determinar cambios de hábitos de conducta observables, excepto indicios indirectos que pueden percibirse con fina sensibilidad en los futuros escenarios vitales donde el alumno se desempeñe.

Si las metas educativas no son suma asociativa de destrezas y conductas externas observables y definibles de manera operacional, escapan al control experimental de la conducta, no pueden evaluarse y en consecuencia tampoco enseñarse de manera conductista, habría entonces que dejarlas por fuera del currículo. Lo saben quienes asumen de manera estricta esta perspectiva conceptual como opción pedagógica.

Sin embargo, hay que reconocer que algunas críticas a esta perspectiva pedagógica son injustas o desfasadas, pues todavía se utiliza y algunos de sus principios son aplicables e imprescindibles:

- El alumno en este enfoque es un espectador pasivo, pues requiere emitir la respuesta o la solución a la situación problemática. Se trata de **aprender haciendo**.
- La repetición y la frecuencia de la práctica es un factor importante para la retención de aprendizajes técnicos y prácticos, que no puede menospreciarse.
- El **reforzamiento**, desde Thorndike, es una adquisición de la psicología educativa que puede alcanzar altos niveles de sutileza y de variedad temporal en su suministro, pero que cuando hay que afianzar el aprendizaje es un factor de motivación externa no descartable.
- La generalización y la **transferencia** del aprendizaje pueden incrementarse en la medida en que se varíen los conceptos de aplicación.
- La asociación e **interrelación** de los aprendizajes, afianza el cambio educativo deseado, tanto más si se realiza de forma jerárquica, como lo recomendó Gagné (1971), aprovechando los tipos más humanísticos que requieren de la cognición, como la discriminación múltiple, el aprendizaje de conceptos y e principios y la solución de problemas.
- La enseñanza **individualizada** es una ganancia importante de esta perspectiva que permite a cada alumno ensayar y practicar su respuesta hasta perfeccionarla, sin que tenga que adelantarse ni retrasarse a sus propias habilidades y competencias.
- La necesidad de **planificar** la enseñanza, de prever la estructura del contenido y de la secuencia de los medios para lograr el aprendizaje, así sea de manera aproximada y probable, es un llamado de atención que debería interesar a los maestros de cualquier enfoque.
- La crítica que no ha podido desvirtuarse es la que señala la poca participación del alumno y del maestro en el diseño de la enseñanza conductista, mantiene la impresión de que se trata de una imposición exterior en que los protagonistas son objeto de entrenamiento. Sobre todo el maestro, que queda con la responsabilidad del **control del ambiente del aprendizaje** cuando él solo puede seguir instrucciones, señalar el estímulo y mostrar el modelo de respuesta previsto, aplicar los instrumentos de evaluación, manejar las correcciones del alumno según las instrucciones de la programación, y elogiar, premiar y promover cuando se le autorice. Este maestro ejecutor de instrucciones puede ser relevado de su papel de instructor por los nuevos computadores.

1.5 EL MODELO PEDAGÓGICO SOCIAL-COGNITIVO

Este modelo propone el desarrollo máximo y multifacético de las capacidades e intereses del alumno. Tal desarrollo está influido por la sociedad, por la colectividad donde el trabajo productivo y la educación están íntimamente unidos para garantizar a

los alumnos no solo el desarrollo del espíritu colectivo sino el conocimiento científico-técnico y el fundamento de la práctica para la formación científica de las nuevas generaciones. El desarrollo intelectual no se identifica con el aprendizaje (como creen los conductistas), ni se produce independientemente del aprendizaje de la ciencia como creen algunos constructivistas. Sus precursores más destacados son Makerenko, Freinet y en América Latina Paulo Freire. Y más recientemente los discípulos de Vigotsky llevaron al aula la aplicación de los principios de la psicología educativa de su maestro.

Los escenarios sociales pueden propiciar oportunidades para que los estudiantes trabajen en forma cooperativa y solucionen problemas que no podrían resolver solos. El trabajo en grupo estimula la crítica mutua, ayuda a los estudiantes a refinar su trabajo y darse coraje y apoyo mutuo para comprometerse en la solución de los problemas comunitarios:

A través de la participación en las comunidades, los estudiantes podrían considerarse a si mismos capaces, incluso obligados, de comprometerse con el análisis crítico y la solución de sus problemas.

Al menos tres requisitos o exigencias debe cumplir la enseñanza según esta pedagogía social:

- a. Los retos y problemas a estudiar son tomados de la realidad, no son ficticios ni académicos y la búsqueda de su solución ofrece la motivación intrínseca que requieren los estudiantes.
- b. El tratamiento y búsqueda de la situación problemática se trabaja de manera integral, no se aísla para llevarla al laboratorio sino que se trabaja con la comunidad involucrada, en su contexto natural, mediante una práctica contextualizada.
- c. Aprovechamiento de la oportunidad de observar a los compañeros en acción, no para limitarlos ni criticarlos sino para revelar los procesos ideológicos implícitos, sus presupuestos, concepciones y marcos de referencia, generalmente ocultos, pero que les permite pensar de determinada manera. El profesor y los participantes, sean alumnos o no de la escuela, están invitados y comprometidos a explicar sus opiniones, acuerdos y desacuerdos sobre el tema de la situación estudiada, y su peso en la discusión no lo da autoridad alguna, sino la fuerza de los argumentos, la coherencia y utilidad de las propuestas y la capacidad de persuasión, aun en contra de las razones académicas del profesor o del libro de texto.
- d. La evaluación en la perspectiva tradicional y en la conductista está dirigida al producto, es una evaluación estática, mientras en el modelo de pedagogía social es dinámica, pues lo que se evalúa es el potencial de aprendizaje que se vuelve real gracias a la enseñanza, a la interacción del alumno con aquellos que son mas expertos que él es Vigotsky quién ha definido el concepto de zonas de desarrollo próximo, que el alumno logra realizar con la ayuda de un buen maestro. En esta perspectiva, la evaluación no se desliga de la enseñanza, sino que detecta el grado de ayuda que requiere el alumno de parte del maestro para resolver el problema por cuenta propia. Por ejemplo la solución de problemas sencillos de aritmética, dónde se ha detectado que los estudiantes pueden fallar por varias razones:

- Porque no entienden la redacción del problema
- Porque no logran representar lingüísticamente lo que se pregunta.
- Por falta de una representación gráfica
- Por falta de una representación matemática
- Por falta de razonamiento lógico.

Si el problema fuera: “Luis tiene 5 camisas; Pedro tiene 3 camisas más que Luis; ¿cuántas camisas tiene Pedro?”; quizás un alumno de quinto de primaria lo resolvería con facilidad.

Pero si el problema fuera:” en secundaria los alumnos son diez veces más que los profesores. En mi colegio hay 40 alumnos, entonces, ¿cuántos profesores tiene?”, quizás no lo resolvería tan fácilmente el mismo alumno de quinto grado, aunque domine las operaciones aritméticas.

Entonces, el profesor de matemáticas debe graduar la dificultad del problema después de ensayarlo con diferentes niños de quinto grado, para luego graduar las ayudas que el alumno requiera a medida que avanza en la comprensión del problema.

El profesor debe suministrar una ayuda cada vez más compleja, a medida que el estudiante lo requiera, en la siguiente secuencia:

- Asegurar la comprensión del enunciado del problema, por ejemplo, cambiándole la presentación o redacción.
- Ayudar a representar lingüísticamente el problema, por ejemplo, mediante dos columnas para que el alumno escriba a la izquierda los datos conocidos y a la derecha los desconocidos, es decir, lo que se pregunta.
- Facilitar que el alumno diseñe de forma gráfica el problema.
- Dar ideas para que formule la representación simbólica, mediante una ecuación (el planteamiento matemático del problema).
- Brindar el modelo del razonamiento requerido para su solución.

Si con la primera ayuda del profesor el alumno no logra resolver el problema, se le suministra la segunda. Si con la segunda tampoco lo logra, se le facilita la tercera y así sucesivamente.

La representación esquemática de este proceso que podría aplicarse a otros aprendizajes.

Desde una perspectiva social-constructivista, se parte de la hipótesis de que el conocimiento y el aprendizaje constituyen una construcción fundamentalmente social, que se realiza a través de un proceso donde los modelos (o ideas previas) interpretativos iniciales de los individuos pueden evolucionar gracias a actividades previas graduales que favorezcan la explicación de los propios puntos de vista y su contrastación con los de los otros (los compañeros, el profesor, las lecturas o los medios de comunicación) y con la propia experiencia.

Desde esta visión, la evaluación, y más aún, la autoevaluación y la coevaluación, constituyen el motor de todo el proceso de construcción del conocimiento.

Con frecuencia el profesor y los que aprenden deben obtener datos y valorar la coherencia de los modelos expuestos y de los procedimientos que se aplican y, en función de ellos, tomar decisiones acerca de la convivencia de introducir cambios en los mismos.

No es el profesor quien da la información que el alumno precisa, tampoco el estudiante es el que descubre cuál es la información que necesita. Más bien sucede que el estudiante identifica lo que conoce, lo que observa y lo que dicen los demás, valora si le interesa o no y toma decisiones sobre si le es útil incorporar los nuevos datos y las nuevas formas de razonar y el profesor evalúa que sucede en el aula, como razonan y actúan los estudiantes y toman decisiones sobre las situaciones didácticas, las actividades, las propuestas que va a plantear al grupo para facilitar la evolución del pensamiento, de las actuaciones y de las actitudes de su alumnado.

Se han caracterizado las perspectivas pedagógicas contemporáneas más destacadas, para mostrarles a los profesores y lector las posibilidades y alternativas de enseñanza y evaluación. Cada modelo pedagógico tiene sus ventajas aunque ninguno es perfecto ni aplicable por completo. Son alternativas que el profesor puede seleccionar según su convivencia, de acuerdo con el tema de la materia, el nivel del grupo de estudiantes, y la confianza que vaya ganando a medida que se arriesgue a ensayar nuevas formas de enseñanza.

Inclusive el profesor no necesita plegarse a ningún modelo y para ciertas asignaturas podría asumir una posición eléctica. Toda enseñanza de calidad requiere de un profesor que tenga claridad acerca de lo que va a enseñar, que sienta gusto por su oficio y por abrirles horizontes culturales a los jóvenes, sin menospreciar sus conocimientos previos o su contexto. El profesor también es responsable del aprendizaje de sus alumnos y no puede desechar experiencias y conceptos pedagógicos que podrían mostrarle nuevos caminos de desempeño docente, pues la misión que cumple requiere de mucho estudio, apertura de pensamiento y esfuerzo.

1.6 LA PERSPECTIVA PEDAGÓGICA COGNITIVA (constructivista)

En esta perspectiva se pueden diferenciar al menos cuatro corrientes:

- a. El modelo constructivista, en su primera corriente, establece que la meta educativa es que cada individuo acceda, progresiva y secuencialmente, a la **etapa superior de su desarrollo intelectual** de acuerdo con las necesidades y condiciones particulares. El maestro debe crear un ambiente estimulante de experiencias que faciliten en el niño su acceso a las estructuras cognoscitivas de la etapa inmediatamente superior. En consecuencia, el contenido de dichas experiencias es secundario, lo importante no es que el niño no aprenda a leer y a escribir, siempre que esto contribuya al afianzamiento y desarrollo de su capacidad de pensar, de reflexionar. Dewey, Piaget y Kolhberg son inspiradores de este modelo.
- b. Una segunda corriente del enfoque cognitivo **se ocupa del contenido** de la enseñanza y del aprendizaje, y privilegia los conceptos y estructuras básicas de las ciencias, por encontrar en ellas un material de alta complejidad que brinda mejores oportunidades de desatar la capacidad intelectual del alumno y enseñarle como un aprendiz de científico. J. Bruner (1973) es el iniciador de este enfoque optimista que asegura que cualquier contenido científico puede ser comprendido por los niños si se les enseña bien y se les traduce a su

lenguaje, facilitando que los niños entiendan por si mismos los conceptos básicos estructurales y los modos de investigar de cada ciencia, como un **aprendizaje por descubrimiento**.

En esta corriente de **enseñanza basada en el descubrimiento**, los alumnos realizan su aprendizaje a medida que experimentan y consultan la bibliografía disponible, analizan la información nueva con la lógica del método científico de la disciplina y deducen sus propios conocimientos. La **evaluación formativa** que realiza el profesor durante el proceso capta sobre todo las posibles desviaciones del alumno del proceso de descubrimiento previsto por el profesor en el desarrollo del modelo científico que caracteriza la disciplina de estudio. El objetivo de la evaluación consiste en obtener información acerca de los descubrimientos del alumno y su grado de apropiación de la estructura básica de la ciencia al final del proceso.

El optimismo innovador e intuicionista de Bruner fue criticado por Ausbel (1978), quién también se ocupa de la enseñanza del contenido de las ciencias, pero no por descubrimiento propio del niño, sino como un aprendizaje que el alumno tomará **significativo** gracias al aporte de su experiencia previa y personal. La contribución de sentido del alumno lo saca de la pasividad y lo convierte en activo constructor de su propio aprendizaje, sin el radicalismo de Bruner, pero manteniéndose como un exponente moderado de la corriente cognitiva.

El profesor debe facilitar que este **aprendizaje significativo** ocurra en sus alumnos, suscitando dudas e interrogantes respecto a los conocimientos que ya poseen, relacionando el tema con su experiencia y saber anteriores, ofreciéndoles oportunidades de ensayar y aplicar el nuevo concepto, asegurándose de que los alumnos formulen de forma adecuada el problema y las soluciones propuestas, para que el aprendizaje sea significativo.

En esta misma corriente se escriben los pedagogos cognitivos dedicados al estudio de la enseñanza de las ciencias, bien enfatizando en la explicación de los prejuicios y las malas interpretaciones de los estudiantes de ciencias, como el estudio de Eylon and Linn (1988) o centrándose en el estudio del **cambio conceptual** de las ideas y teorías de los alumnos sobre el mundo mediante el proceso que implica el desplazamiento (¿o subordinación?) del viejo concepto a la teoría aprendida; este proceso se resume a continuación:

Enfoque del cambio conceptual de la enseñanza:

Introducción: el profesor proporciona organizadores avanzados, revisión y motivación de experiencias.

Punto central: los estudiantes son testigos de un evento. Se plantea un problema. El profesor proporciona oportunidades a los estudiantes para hacer explícitas sus opiniones y explicaciones de los eventos.

Desafío y desarrollo: el conflicto se introduce a través de la presentación de un evento discrepante y/o cuestionamiento socrático. Los estudiantes se reflejan en sus planteamientos. Se introducen nuevas ideas que resuelven las discrepancias, por ejemplo, nuevas analogías.

Aplicación: los estudiantes resuelven los problemas mediante las nuevas ideas; analizan y debaten sus méritos.

Resumen: el profesor y/o los estudiantes sintetizan los hallazgos y los vinculan a otras lecciones.

- c. Una tercera corriente cognitiva orienta la enseñanza y el currículo hacia la formación de ciertas **habilidades cognitivas** que se consideran mas importantes que el contenido, científico o no donde se desarrollan. Por ejemplo, Hilda Taba (1967) propone que la enseñanza debe dirigirse a propiciar en los alumnos el pensamiento inductivo y para ello propone algunas estrategias y actividades secuenciadas y estimuladas por el profesor mediante preguntas desafiantes formuladas en el momento oportuno, en un proceso inductivo.

Otros trabajos cognitivos de la corriente de **habilidades de pensamiento** se han aplicado también en la enseñanza y están relacionados con el pensamiento lateral y creativo de De Bono (1970) e, incluso, con, habilidades propias del pensamiento artístico y su hermenéutica (EISNER, 1998). En la década de los 90 empiezan a aparecer estudios que aproximan esta corriente con la de enseñanza-aprendizaje significativo de contenidos científicos, con el argumento de que las habilidades no se desarrollan en abstracto, requieren del contenido conceptual, y a su vez “los conceptos se desarrollan siempre en contextos de razonamiento y de solución de problemas... No hay que escoger entre un énfasis en contenido y un énfasis en habilidades del pensamiento”.(RESNICK, 1989, p.6).

- d. Una cuarta corriente **social-cognitiva** que basa los éxitos de la enseñanza en la interacción y de la comunicación de los alumnos y en el debate y la crítica argumentativa del grupo para lograr resultados cognitivos y éticos colectivos y soluciones a los problemas reales comunitarios mediante la interacción teórico-práctica, será tratada a profundidad a continuación como una perspectiva separada, denominada **pedagogía social constructivista**.

A diferencia de los pedagogos conductistas, los cognitivos empeñan su enseñanza en lograr que los alumnos aprendan a pensar, se autoenriquezcan en su interioridad con estructuras, esquemas y operaciones mentales internas que les permitan pensar, resolver, y decidir con éxito situaciones académicas y vivenciales. Los aprendizajes en la perspectiva cognitiva deben ser significativos y requieren de la reflexión, comprensión y construcción de sentido. La mente no es una “estructura plana” sobre la cual se imprimen las representaciones e las cosas, la mente no es un espejo fiel; es una estructura multidimensional activa y transformadora que produce ideas y teorías a través de su anterior experiencia y de su acción sobre ellas. Los sujetos cognoscitivos, los aprendices, no son receptores pasivos de información; lo que reciben lo reinterpretan desde el mundo interior, lo leen con sus propios esquemas para producir sus propios sentidos, porque entender es pensar y pensar es construir sentido, por ello, a los pedagogos cognitivos también se les denomina **constructivistas**.

Algunas otras características que comparten todas las corrientes cognitivas son las siguientes:

- a. En cuanto a la percepción prefieren no solo recoger la tradición gestáltica de la percepción globalizada, sino dirigir la observación **hacia el nicho natural del objeto, sin aislarlo** ni desarraigarlo de sus relaciones orgánicas con el mundo que lo rodea.

- b. La organización del conocimiento no se presenta como marcha de lo simple a lo complejo, o de la parte al todo, sino que el todo siempre esta presente desde el principio de la enseñanza, aunque deba avanzarse para la comprensión de otros niveles de profundidad. El sentido es necesario desde el principio para lograr aprendizajes significativos.
- c. La **comprensión** es el aprendizaje significativo es imprescindible. No se autorizan fases de enseñanza memorísticas, o de ejercitación mecánica de movimientos o de formulas.
- d. El aprendizaje significaivo requiere confirmación, **retroalimentación, cognoscitiva** que permita corregir errores y ajustar desviaciones mediante el debate y la discusión con los pares; pero sobre todo ensayando y probando en la experiencia cada conjetura, cada hipótesis, en el campo de las ciencias naturales y en el de las sociales; eso si, con la certeza de que no se trata de un camino determinista que conduce con exactitud a una sola respuesta correcta, sino a una aproximación probable de alguna de las soluciones plausibles. No se trata tampoco de verificar la respuesta en el libro ni la teoría del profesor, sino de confrontar y hacer viable la conjetura del alumno, no desde afuera, sino desde la iniciativa racional que la sustenta, con el estímulo y la ayuda del profesor y del grupo.
- e. **La evaluación del aprendizaje significativo**, no se diferencia de la retroalimentación permanente del proceso de conocimiento del alumno desde el cual comienza a cuestionarse su saber previo. La generación del conflicto cognitivo, la formulación de nuevos sentidos o conjeturas que interpreten de manera coherente la situación problemática (incluyendo las diferentes formas de representación del problema) y las experiencias de confirmación de la hipótesis, son fases claramente diferenciadas que permiten la observación y el seguimiento del profesor, sin perder el sentido genético de los ogros de aprendizaje al final del proceso y disponiendo de un marco de sentido global para interpretar los avances de cada alumno, cualquiera que sea el nivel de competencia avanzado en el tema, como una evaluación de referente personal.

Por supuesto que hay detalles observables que sirven de indicadores de los avances de cada alumno a medida que le ocurren reestructuraciones teóricas, cambios conceptuales, adquisición de destrezas argumentativas y experimentales, pruebas, refutaciones, nuevas interpretaciones, reorganización de datos, búsquedas de nuevos datos, inferencias y conclusiones, etcétera.

Cuando se trata de evaluar habilidades de pensamiento en general y en abstracto, deberían ser los psicólogos los llamados a realizar este tipo de pruebas. Pero dado que las habilidades no son generales, ni abstractas, sino que se desarrollan sobre contenidos específicos, los profesores de cada ciencia y disciplina disponen de herramientas y son los mejores testigos (y estimuladores) del desarrollo intelectual de sus alumnos, a medida que se despliegan su enseñanza en la perspectiva cognitiva.

Aunque la primera evaluación y la mas importante retroalimentación no ocurre por cuenta del profesor sino del alumno mismo, cuando sumergido en sus pensamientos organiza y confronta sus propias ideas y experiencias, y las compara y sintetiza en un proceso de autorregulación no deliberado, que luego le permite pensar y reflexionar sobre la pregunta inicial, con la cual el profesor suscita un conflicto cognitivo, un

cuestionamiento radical que le promueve la búsqueda de conjeturas mas consistentes, coherentes, comprensivas y útiles.

1.7 APLICACIÓN DEL CONSTRUCTIVISMO EN LA ENSEÑANZA DE LA TECNOLOGÍA.

Dado que esta corriente pedagógica requiere la utilización de las capacidades creativas del alumno, es necesario recurrir, en el caso de la educación universitaria, al uso de la informática y de las nuevas tecnologías. en ese sentido, se han producido una serie de avances tecnológicos que han posibilitado el progreso en esta materia:

- El desarrollo de las computadoras capaces de almacenar gran cantidad de información, y la posibilidad de acceder a ella en un abrir y cerrar de ojos.
- El mejoramiento de las telecomunicaciones, que pone a disposición tecnologías avanzadas de audio y vídeo.
- El desarrollo de las tecnologías de multimedios, que revoluciona tanto la producción como la presentación de programas polivalentes por medio del uso del computador.
- La creación de grandes bancos de datos y su relación con redes globales de computadoras de varios países.

1.7.1 Características de la Enseñanza a través de la Tecnología La forma de evaluar el ambiente de los estudiantes equipados con medios de información y comunicación electrónica puede ser encarada a priori por dos factores:

1. La enseñanza activa de los estudiantes, pues ellos pueden, leyendo, escribiendo y diseñando, participar en forma interactiva del proceso de aprendizaje.
2. El poder del lenguaje audiovisual, que fuera resaltado por Paul Heimann, pionero de la enseñanza, puede ahora ser utilizado plenamente en un nivel de diferenciación bien diverso.

Según los criterios tradicionales, solo por estas dos razones, el ambiente de enseñanza digitalizado ya sería un progreso, y tendría compensada su inversión.

Esta primera visión no abarca todo lo que un ambiente digitalizado puede realizar, ya que él está en condiciones no solo de reforzar determinados comportamientos de la educación, sino también de modificarla estructuralmente, facilitando la tarea del docente y del alumno fundamentalmente, a través de dos formas a saber:

1. Enseñanza por archivos: Durante el estudio, el alumno puede en cualquier momento seleccionar, copiar, pegar o grabar cualquier parte de la información que está tratando, y luego accederla nuevamente con solo realizar una operación con el "mouse" . Esto permite que la re-memorización, revisión y comparación generen una técnica activadora que se integra con el proceso de aprendizaje y permite manejar gran cantidad de datos fácilmente.
2. Enseñanza con hipermedias: En un ambiente digital, los estudiantes pueden, a

través de un hipertexto, bucear profundamente en los tópicos interesantes que hacen a un mejor entendimiento del tema que se está analizando, ya que un hipermedio no es apenas la página de un libro o de una revista científica, porque estaríamos despreciando el verdadero potencial didáctico que tiene, sino por el contrario es una herramienta que permite una inmediata disponibilidad de la información deseada, colocando al alumno en una condición excelente para investigar lo mejor que crea por medio de informaciones objetivas, derivaciones y fundamentaciones históricas, consideraciones teórico - científicas, posiciones y opiniones encontradas, etc. Este tipo de organización debe ser utilizada con cuidado por parte del usuario, ya que se genera un pequeño cosmos multidimensional de saber, en la cual el estudiante tiene que poder orientarse.

Debemos incluir en este contexto una modificación del comportamiento de los docentes y de los alumnos, que explicaremos detalladamente. Los docentes van a tener que aprender a trabajar simultáneamente en varios niveles, creando unidades que contengan textos, gráficos, videos, comentarios y ejercicios, y que estén relacionadas a través de “links”, generando una red que puede ser estructurada de tal manera que los alumnos puedan pasar de un nivel a otro sorteando diferentes escalas de complejidad, casi haciendo analogía a cualquier juego de computadoras. El desarrollo de estas versiones de hipermedios es una tarea difícil, pero no imposible, y seguramente implica una dedicación especial, persiguiendo mejores “herramientas” para la educación.

Los estudiantes, por su parte, deberán adaptarse al nuevo método de aprendizaje, primero porque se le da la libertad de tomar decisiones en lo que respecta a la marcha de sus estudios, y segundo porque ellos mismos deben encontrar el camino más conveniente para su entendimiento, dejando de lado aquellas informaciones secundarias que no contribuyen demasiado, según su criterio, y que en definitiva pueden crear conflictos. Eso los obliga a crear estrategias para realizar sus tareas. De alguna manera esto ocurre cuando un estudiante debe realizar la consulta en varios libros, tomando lo que precisa y descartando el resto, realizando los descubrimientos por cuenta propia e integrándolos a su saber existente. Este es un procedimiento exploratorio – asociativo en el cosmos de la ciencia de hipertextos en la que toda la información nueva debe ser verificada para ver si ella dice algo que esté relacionado con la meta propuesta por el usuario. Este método se denomina “Browsing”. El trayecto para llegar a la meta podría también ser establecido por los docentes, siempre que estos pretendan conducir a los estudiantes por una secuencia bien definida con el fin de lograr ciertos efectos didácticos, y en ese caso los “links” se activan con una definida automaticidad. Se podrá exhibir en la pantalla con ventanas explicativas el camino preestablecido, o bien mediante expresiones orales, o mezcla de ambas. Este método es llamado “guided tour”. Según Kuhlem (29), “El Browsing asociativo es el placer de investigar con hipertextos, y la navegación controlada... la disciplina. Ambas cosas en conjunto llevan al objetivo propuesto, más allá de la imposición y el caos”.

El estudio a través de medios digitales, con todas sus nuevas formas de trabajo, ha facilitado enormemente el estudio autónomo. En virtud del dominio del tradicional método de enseñanza expositivo, esta forma de aprendizaje siempre fue bastante difícil desde sus raíces y grandemente rechazada, porque no existía una manera segura en que el alumno fuera guiado sin la presencia del docente para apoyarlo constantemente, pero los recursos computacionales actualmente disponibles, tanto en hardware como en software, permiten generar, de manera relativamente simple y rápida, imágenes tridimensionales que reproducen de manera virtual fenómenos que anteriormente solo eran posibles de visualizar en experiencias de laboratorio, tal vez

con equipos costosos, o con un gran tiempo de preparación para su ejecución. Con esto no se pretende eliminar estas experiencias, sino tratar de que el alumno se prepare mejor para realizarlas, mediante un análisis previo y autónomo extra clase, que surge de haberlo visto en forma virtual, lo que finalizaría en un mejor aprovechamiento de las mismas.

Por otra parte, estas imágenes tridimensionales pueden representar de manera virtual, a través de animaciones, algunos conceptos, ideas y abstracciones que no existen de forma visible en el mundo real, y que muchas veces son fundamentales para comprender los fenómenos físicos de las materias con que están relacionados, como por ejemplo el caso del análisis de tensiones en estructuras sometidas a solicitaciones de distintos tipos.

2. MÁQUINAS SÍNCRONAS

2.1 DEFINICIÓN

Máquina eléctrica es aquella en la cual al menos una de las formas de energía que maneja es de naturaleza eléctrica.

En este tipo de máquinas la primera distinción que se debe hacer se refiere al tipo de corriente eléctrica con la cual operan y que puede ser “corriente continua” o “corriente alterna”; a su vez cuando las máquinas son de corriente alterna pueden ser monofásicas o polifásicas.

Otra clasificación importante de las máquinas eléctricas se puede hacer en torno a la circunstancia de que la energía eléctrica se tenga a la entrada o a la salida de la máquina eléctrica; las máquinas que tengan energía eléctrica a la salida y energía mecánica a la entrada se conocen como **generadores eléctricos**; en cambio las máquinas que tienen como entrada energía eléctrica y como salida energía mecánica se conocen como **motores eléctricos**. En general, en tanto la entrada y la salida es eléctrica se conocen como convertidores, y en particular cuando la energía eléctrica de entrada y salida es corriente alterna, se conocen como transformadores.

Algunos tipos de máquinas eléctricas de corriente alterna funcionan a una velocidad llamada de sincronismo y que está ligada rígidamente a la frecuencia de la red. A estas máquinas se les conoce como **máquinas síncronas** (motores y generadores cuya corriente de campo magnético la suministra una fuente de potencia de cd externa).

2.2 MOTOR ELÉCTRICO

Básicamente los motores eléctricos son máquinas giratorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica.

La entrada de alimentación de los motores eléctricos está constituida físicamente por los terminales de conexión, mientras que la salida de energía mecánica es provista por el eje giratorio: en esencia los motores tienen una función opuesta en cierto modo a la de los generadores invirtiendo el flujo de la energía. Estos mismos pueden ser de corriente continua o de corriente alterna, monofásicos o trifásicos. También pueden ser síncronos o asíncronos (motor de inducción).

2.3 GENERADOR ELÉCTRICO

Son máquinas que transforman en energía eléctrica otras formas de energía.

La entrada de la máquina está compuesta en el eje de rotación en donde se aplica la energía mecánica, la cual consigue ser transformada a través del principio de inducción electromagnética en energía eléctrica; es llevada por medio de unos terminales de alimentación los cuales conectan al generador con la red externa.

Las características eléctricas principales a tener en cuenta en un generador son: el voltaje generado en terminales y la capacidad de corriente que se puede entregar.

Si la corriente entregada es continua se le denomina “generador de corriente continua” y si es alterna se le llama “generador de corriente alterna” o alternador.

Los generadores de corriente alterna pueden ser constructivamente monofásicos o trifásicos aun cuando en la práctica la mayoría son trifásicos por razones técnicas y económicas de acuerdo con la estructura de los sistemas eléctricos. También pueden ser síncronos o asíncronos, siendo así el más utilizado el generador síncrono para este tipo de aplicación.

2.4 UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS

Tanto en el motor como en el generador se tiene un movimiento relativo entre un campo magnético y los conductores de la máquina. Esto da lugar a varias posibilidades y alternativas interesantes en el establecimiento de que será el rotor (la parte de la máquina que gira) y que será el estator (la parte de la máquina fija).

Por lo tanto una máquina eléctrica tiene dos estructuras intercambiables es decir, el campo ubicado en el estator y el inducido en el rotor, o viceversa.

Por ende los tipos de posibilidades para las máquinas síncronas son:

1. la máquina síncrona, con un inducido móvil (rotor) y un inductor fijo (estator).
2. la máquina síncrona, con un inductor móvil (rotor) y un inducido fijo (estator).

Cabría entonces preguntarse ¿Qué es más recomendado?

La conversión de energía fundamentalmente se realiza en el inducido: allí se producen las grandes corrientes. Se ve entonces que manejarlas en el rotor, con el consecuente problema que representan las escobillas, no es lo mas aconsejable; así, lo recomendable es un inductor móvil y un inducido fijo.

2.4.1 La máquina síncrona, con un inducido móvil (rotor) y un inductor fijo (estator) El devanado del inducido (rotor) se saca al exterior a través tanto de anillos rozantes como de un colector.

Este tipo de máquina encuentra su aplicación mas importante en el convertidor síncrono o rotatorio, que se utiliza para convertir la corriente continua en corriente alterna o viceversa. Si se aplica corriente continua en las escobillas, la máquina funciona motor cd y alternador de ca, simultáneamente. Si a los anillos rozantes se les aplica corriente alterna, la máquina funciona como motor de ac y generador dc simultáneamente. La **Figura 1** muestra el esquema de este tipo de máquina.

2.4.2 La máquina síncrona, con un Inductor móvil (rotor) e Inducido fijo (estator) Esta máquina, el devanado de excitación es alimentado mediante una fuente cd a través de dos anillos rozantes y el inducido se conecta directamente a una fuente polifásica ca o a una carga.

Si el inducido (estator) se conecta a una alimentación de ca polifásica y se suministra cd al rotor, a través de los anillos, la máquina funcionará como motor síncrono y el rotor girará a una velocidad síncrona en sincronismo con el campo giratorio que establece el devanado del estator determinado por el número de polos y la frecuencia de alimentación. Si el rotor ya sea de polos salientes o lisos, se hace girar a una velocidad síncrona mediante un motor primario, la máquina funcionará como generador, ya sea monofásico o polifásico, según las conexiones del inducido. La **Figura 2** muestra este tipo de máquina.

Figura 1. Máquina síncrona, con Inducido móvil e Inductor fijo

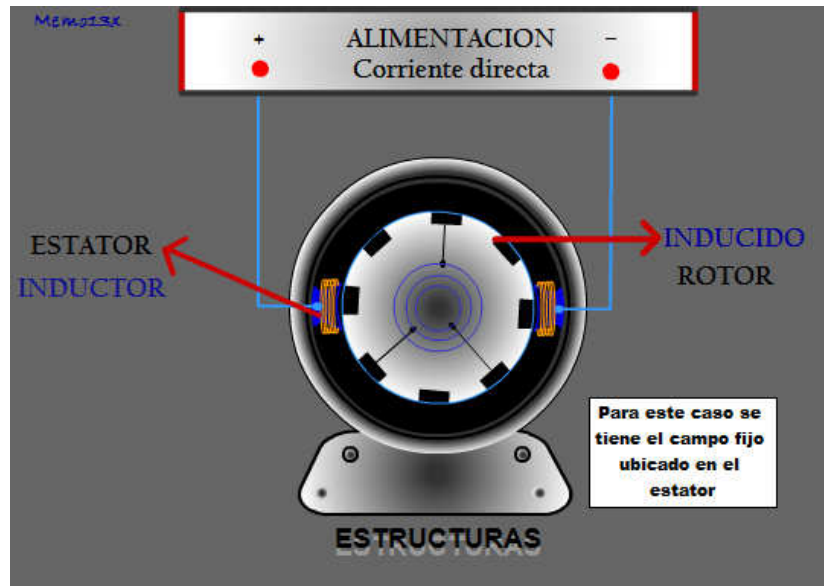
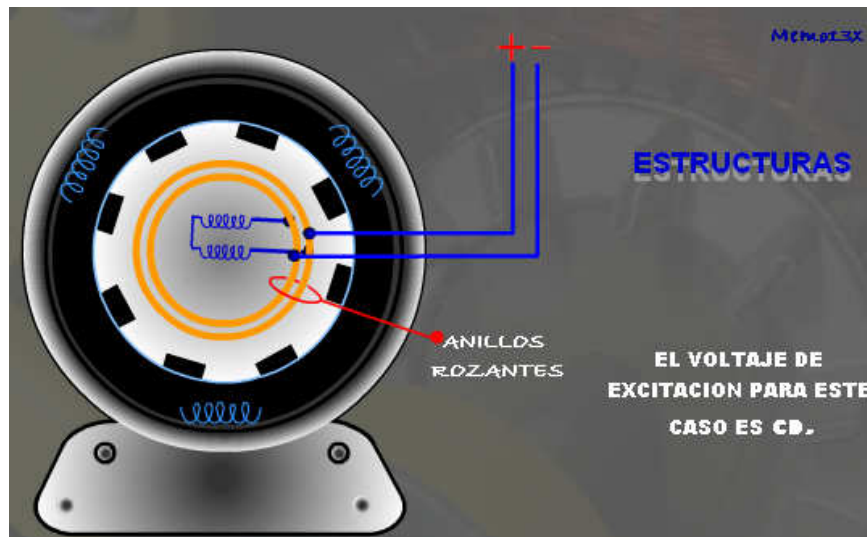


Figura 2. Máquina síncrona, con Inductor móvil e Inducido fijo



2.5 CONSTRUCCION

Tanto en la máquina síncrona como en la máquina de cd se utiliza el mismo tipo de estator, donde se ubica el devanado de excitación, el cual es alimentado mediante una fuente cd.

El rotor de la máquina consiste en:

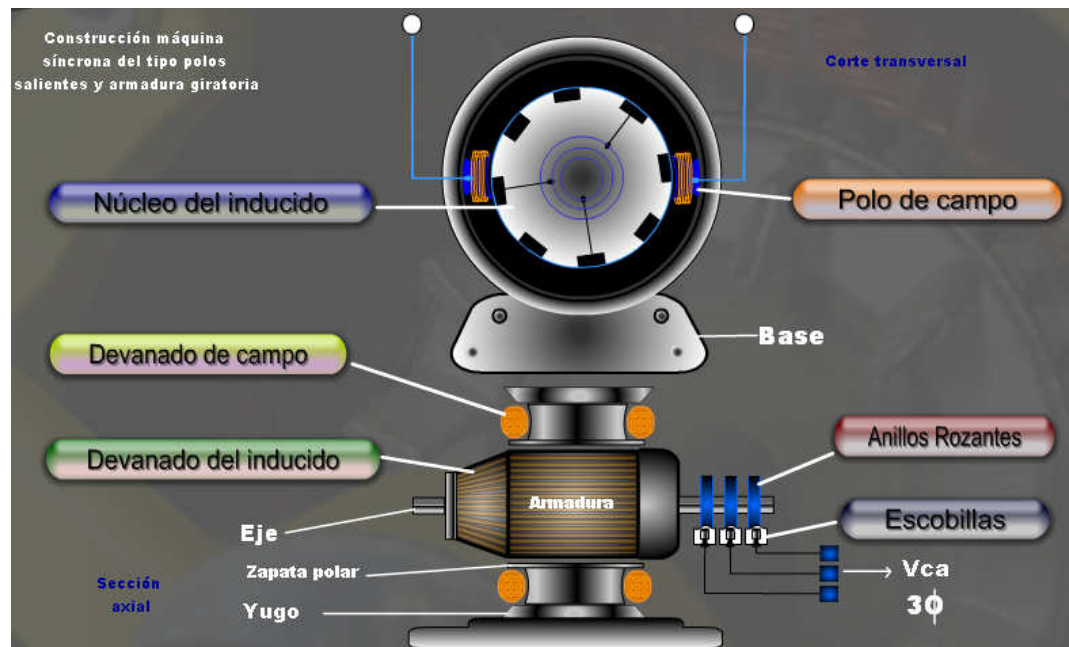
- Eje de armadura
- Núcleos de la armadura
- El devanado de la armadura
- Anillos rozantes

El estator de la máquina consiste en:

- Un yugo o armazón
- Núcleo de los polos
- Polos de campo
- Escobillas y el porta escobillas
- Detalles mecánicos--- escudos, tapas

La **Figura 3** muestra las partes constructivas de una máquina síncrona:

Figura 3. Partes Constructivas de la máquina síncrona



2.6 CAMPO GIRATORIO

Si hay dos campos magnéticos presentes en una máquina, entonces se crea un par que tenderá a alinearlos. Si un campo magnético lo produce el estator de una máquina ac y el otro lo produce el rotor de la máquina, entonces se inducirá un par en el rotor que hará que el rotor gire y se alinee con el campo magnético del estator.

Si hubiera una manera de hacer girar el campo magnético del estator, entonces el par inducido por el rotor provocaría que “persiguiera” constantemente en círculos al campo magnético del estator.

Esto en breves palabras es el principio básico de la operación de un motor ca.

¿Cómo se puede lograr que el campo magnético del estator gire?

El principio fundamental de la operación de las máquinas ca es que si un grupo de corrientes trifásicas, cada una de igual magnitud y desfasada, entre ellos 120 grados eléctricos, fluye en un devanado trifásico, entonces producirán un campo magnético giratorio de magnitud constante.

Un devanado trifásico consta de tres devanados individuales separados 120 grados eléctricos alrededor de la superficie de la máquina.

El caso más sencillo de un campo magnético giratorio es un estator que contiene tres bobinas, cada una separados 120 grados eléctricos. Debido a que cada bobina solo produce un polo magnético norte y uno sur, es un devanado de dos polos.

Asúmase que las corrientes de las tres bobinas se obtienen de las ecuaciones:

$$i_a = I_m \sen(\omega t)$$

$$i_b = I_m \sen(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \sen(\omega t + 120^\circ)$$

F_a , F_b y F_c , en las **Figuras 4, 5, 6 y 7** representan los campos producidos por las diferentes corrientes con su dirección mostrada, en caso de tener corrientes negativas, el sentido de las F se invierte, además su magnitud será variable en la medida que las corrientes varíen.

Se configura un sistema que involucra bobinas en el espacio a iguales distancias, alimentadas con corrientes equilibradas que varían en el tiempo. Se pretende observar lo que ocurre cuando avanza el tiempo, con el campo resultante de esas 3 bobinas, para ello se estudia el problema en forma gráfica y luego se sacan conclusiones.

Se supone que la amplitud máxima de corriente I_m produce a su vez F_m .

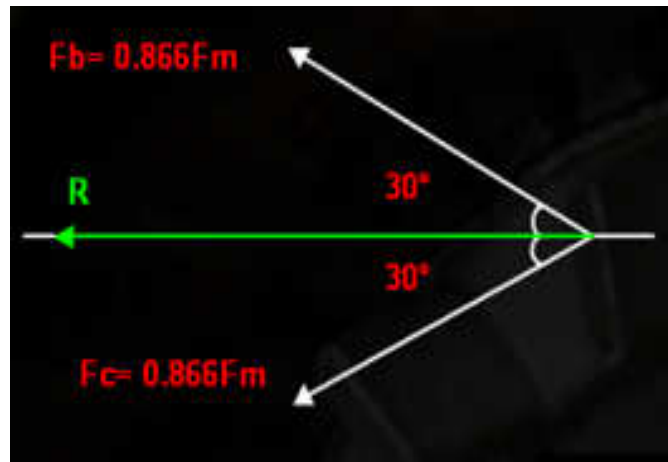
Para $t = 0$:

$$i_a = 0 ; i_b = -0.8666 I_m ; i_c = 0.8666 I_m$$

En este instante de tiempo el campo que se produce es:

$$R = 2[0.8666 F_m \cos(30)] = 1.5 F_m \text{ (horizontal a la izquierda). Ver Figura 4}$$

Figura 4. Campo Resultante en $t=0$



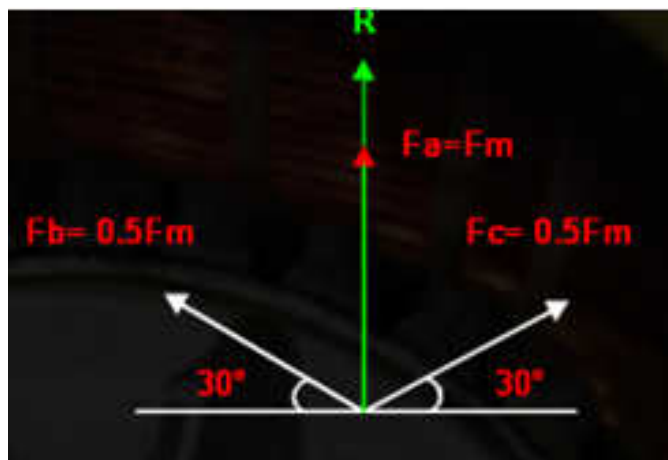
Para: $\omega t = 90$ grados eléctricos

$$I_a = I_m ; I_b = -0.5 I_m ; I_c = -0.5 I_m$$

Las componentes horizontales se cancelan.

$$R = F_m + 2 [(F_m/2) \sin(30)] = 1.5 F_m \text{ (vertical hacia arriba). Ver Figura 5}$$

Figura 5. Campo Resultante en $\omega t=90^\circ$



Para: $\omega t = 135$ grados eléctricos

$$I_a = 0.7071 I_m ; I_b = 0.2588 I_m ; I_c = -0.9659 I_m$$

La componente horizontal resultantes es:

$$0.9659 F_m \cos(30) + 0.2588 F_m \cos(30) = 1.0606 F_m$$

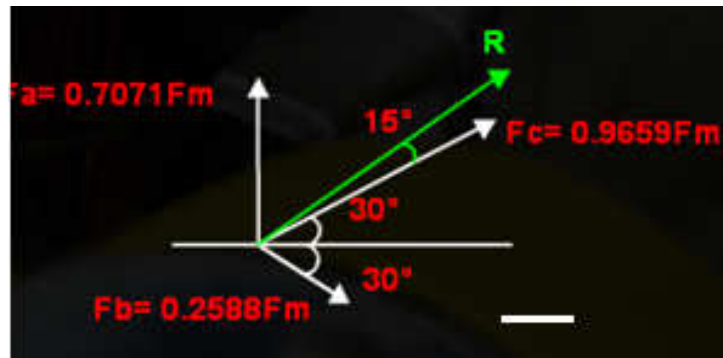
La componente vertical resultante es:

$$0.7071 F_m + 0.9659 F_m \sin(30) - 0.2588 F_m \sin(30) = 1.0606 F_m$$

Por Pitágoras se obtiene la resultante total:

$R = 1.5 F_m$ (en primer cuadrante a 45 grados eléctricos con la horizontal). Ver **Figura 6**.

Figura 6. Campo Resultante en $\omega t = 135^\circ$

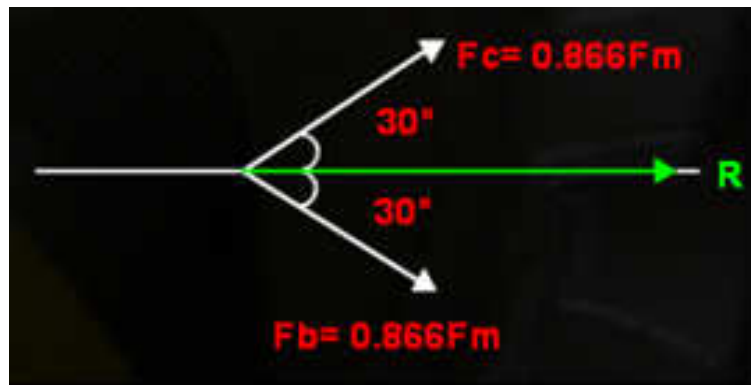


Para $\omega t = 180$ grados eléctricos

$$i_a = 0 ; i_b = 0.866 I_m ; i_c = -0.8666 I_m$$

$R = 1.5 F_m$ (horizontal a la derecha); **Figura 7**.

Figura 7. Campo Resultante en $t = 180^\circ$



Resumiendo:

Bobinas adecuadamente espaciadas, alimentadas con corrientes polifásicas balanceadas, producen un campo magnético giratorio de amplitud constante. Es también cierta la aseveración opuesta: un campo magnético giratorio de amplitud constante inducirá voltajes polifásicos balanceados en bobinas adecuadamente espaciadas; esto es un alternador (generador de corriente alterna) trifásico, se obtiene por medio de tres bobinas iguales en el estator, aislados entre si y desplazados 120 grados eléctricos, los cuales son atravesados por el campo magnético giratorio.

El campo rotatorio en caso de motores depende de la secuencia de los voltajes de alimentación: si se invierten dos fases el sentido de giro cambia.

2.7 VOLTAJE INDUCIDO (E_g)

Debido a la diferencia que existe entre grados eléctricos y mecánicos al igual que entre velocidades angulares eléctricas (ω_e) y mecánicas (ω_m), se sabe que el factor de conversión es: ($P/2$), siendo P el número de polos.

Así:

$$\omega_e = \omega_m (P/2) \quad \text{ó} \quad 2\pi f = [(\eta \text{ (rev/min)})/60]2\pi(P/2)$$

$$\eta \text{ (rev/min)} = 120 f/P$$

Dónde:

$\eta \text{ (rev/min)}$: velocidad síncrona de la máquina en revoluciones por minuto

La última expresión (que no está en unidades S.I.), permite obtener la velocidad de accionamiento conocida la frecuencia en el caso de motores; en el caso de alternadores se puede derivar la frecuencia de los voltajes inducidos según sea la velocidad.

Los valores de frecuencia preferiblemente utilizados a nivel industrial son 50 y 60 Hz. Otros valores, en tracción eléctrica 16.66 Hz, en herramientas y en aviación se necesitan frecuencias de 100 hasta 400 Hz.

El factor de forma que relaciona el valor rms al valor medio en circuitos rectificadores de onda completa es: V_{rms}/V_{medio}

Con:

$$V_{rms} = V_p / \sqrt{2} \quad ; \quad V_{medio} = 2 V_p / \pi$$

$$\text{Así: } V_{rms}/V_{medio} = 1.11$$

Se utiliza la expresión obtenida en máquinas cd para el valor medio y se multiplica por el factor de forma para obtener el valor rms de interés en el estudio de las máquinas ca.

Así:

$$E_g \text{ (rms)} = 1.11 (PZ/2\pi) \Phi \omega.$$

En el caso de bobinados de ca, $[Z/2]$ es el número de espiras, sin embargo interesa el número de espiras por fase (N) que están en serie; el número de ramas en paralelo es uno. La fórmula anterior queda en consecuencia:

$$E_g = 1.11 (PN/\pi) \Phi \omega \quad \text{o en función de la velocidad angular eléctrica:}$$

$$E_g = 1.11 (PN/\pi) \Phi (\omega_e)(2/P)$$

En función de la frecuencia

$$E_g = 1.11 (N/\pi) \Phi 4\pi f$$

$$E_g = 4.44 N f \Phi \quad (1)$$

Dónde:

N : Número de espiras por fase

f : Frecuencia eléctrica

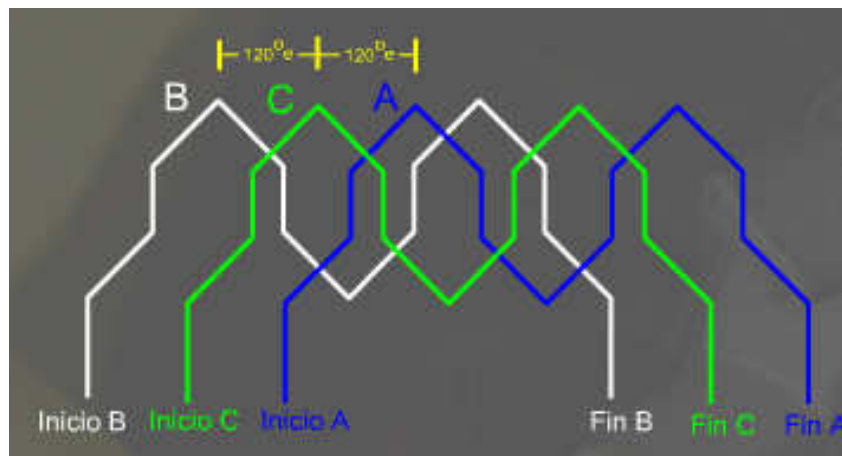
Φ : Flujo

En ocasiones se desea obtener el voltaje inducido por bobina. En este caso la ecuación (1) se podrá utilizar, teniendo presente que N deberá acomodarse y ser ahora el número de espiras por bobina.

2.8 DEVANADOS DEL INDUCIDO EN LA MAQUINA SINCRONA.

Los devanados del inducido en la máquina síncrona pueden ser ondulados o imbricados. Como no se requiere la conmutación, no es necesario devanados cerrados, son abiertos. A manera de ejemplo se ilustra en la **Figura 8** un pequeño bobinado de una máquina trifásica.

Figura 8. Bobinado máquina síncrona

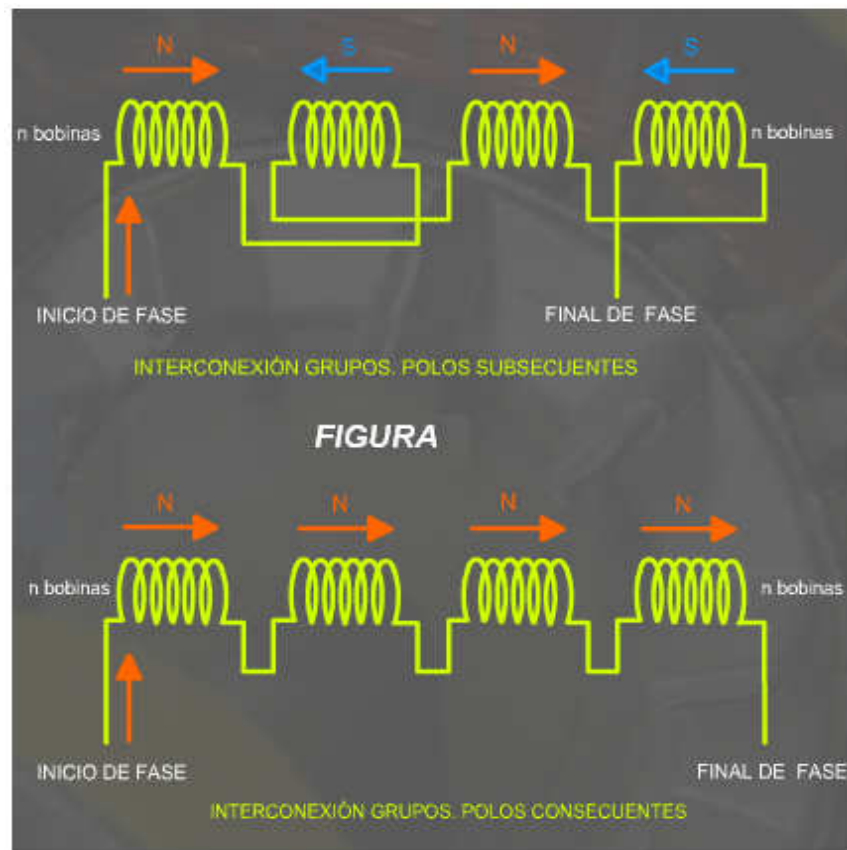


Cada lado de bobina se separa del otro por aproximadamente 180 grados eléctricos (paso diametral). La separación entre fases es obviamente 120 grados eléctricos.

En devanados polifásicos, primero se procede a determinar el número total de bobinas según sea el número de ranuras y el tipo de bobinado; este se reparte entre el número de fases ($N_{bob}/fase$). Seguidamente se procede a realizar el bobinado para una fase, las otras serán similares. Se determina el número de bobinas que corresponde a cada polo (dividiendo el último resultado entre la cantidad de polos), esto recibe el nombre de grupo.

Con $n = N_{bob}/(fase-polo)$, obviamente existen tantos grupos como polos. Una manera de interconectar los grupos en una máquina de 4 polos es como se muestra en la **Figura 9**.

Figura 9. Interconexión Grupos



En ocasiones se realiza la conexión entre grupos mostrada en la **Figura 9**. Se logran 4 polos norte y entre ellos los polos sur asociados, es decir se duplica la cantidad de polos y se obtiene en velocidad la mitad de la original. El primer método de conexión se denomina de polos convencionales (o subsecuentes) y el segundo de polos consecuentes.

Por razones económicas o para reducir problemas de armónicos, el paso diametral no siempre se realiza.

Cuando el paso es fraccional se debe hacer algún tipo de corrección al voltaje inducido E_g ; esto se logra con lo que se denomina el factor de paso.

2.8.1 Factor de paso En caso de tener bobinas con paso diametral, el voltaje de la bobina es 2 veces el voltaje de un lado de bobina (suma aritmética); sin embargo si el paso no es diametral, el verdadero voltaje de la bobina se obtiene realizando una suma fasorial de los voltajes de cada lado de bobina.

Se define el Factor de paso (K_p) como:

$$K_p = (\sum \text{fasorial} = \text{valor verdadero}) / (\sum \text{escalar})$$

La utilidad se manifiesta entonces en que al obtener el factor de paso, se podrá trabajar con sumas aritméticas, fáciles de realizar y se corrige por el factor de paso.

$$\text{Valor verdadero} = K_p \sum \text{escalar}$$

Las **Figuras 10 y 11** ilustran la forma en que se debe operar.

Paso diametral:

$$K_p = E_c / (E_1 + E_2) \quad ; \quad E_c = E_1 + E_2 \quad ; \quad K_p = 1$$

Paso no diametral:

Se puede demostrar que:

$$K_p = \sin(p/2)$$

Donde p = paso de bobina medido en grados eléctricos.

Además, en ocasiones el paso de bobina se expresa en los siguientes términos:

- Como una fracción. Esta se entiende que es una fracción de 180 grados eléctricos que es el paso diametral.

$$\text{Ej: } 7/8 \quad ; \quad p = 7/8 * 180^\circ = 157.5^\circ$$

- En ranuras.
Ej: paso de 1 a 12.

Figura 10. Voltaje de bobina diametral

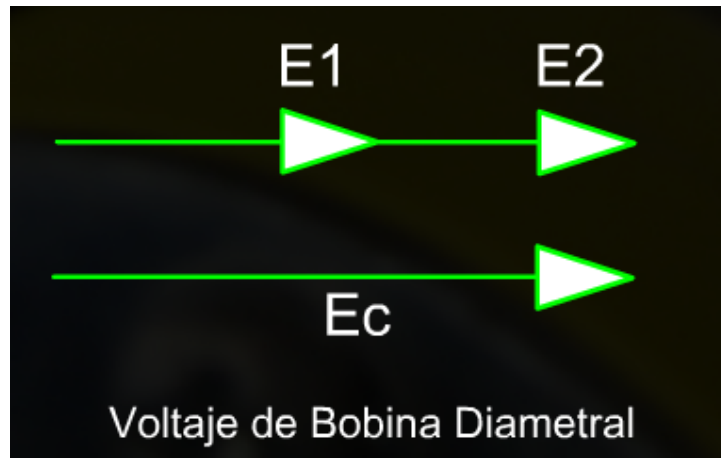
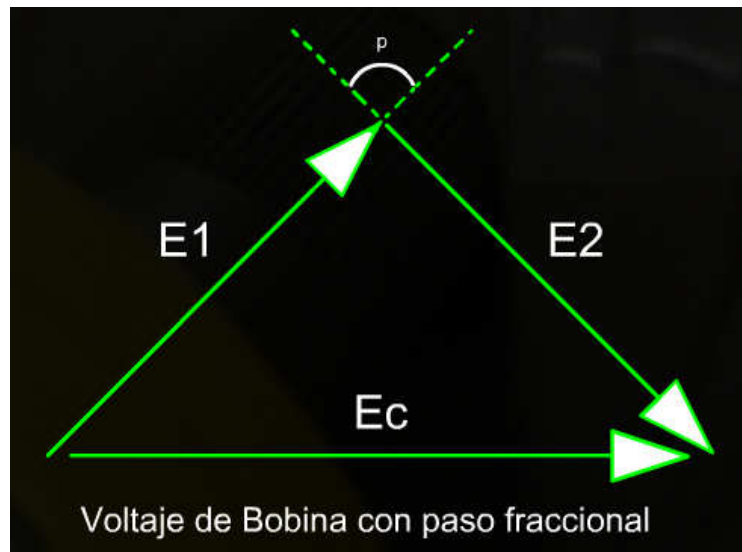


Figura 11. Voltaje de bobina con paso fraccional



2.8.2 Factor de Distribución En los devanados se conoce como **Grupo**, al conjunto de bobinas en cada polo de cada fase, es decir, cuantitativamente es el número de bobinas por fase y por polo (n). Cuando n vale 1, el devanado es concentrado y no distribuido, lo corriente es que sea distribuido. Las n bobinas del grupo estarán desplazadas entre si.

Si el factor de paso corrige el hecho de tener lados de bobina no diametrales, se hace necesario considerar que el verdadero voltaje inducido en un Grupo, será la sumatoria

En la **Figura 12** se muestra la situación expuesta. En este caso hay 4 bobinas por fase y por polo (grupo de 4 bobinas). La diferencia angular entre sus fases es α , que corresponde a los grados eléctricos entre ranuras adyacentes.

El ángulo externo en un triángulo es igual a la suma de los internos no adyacentes:

así: $\beta = \delta$

$$K_d = \sum \text{fasorial} / \sum \text{escalar}$$
$$E_{grupo} = K_d \sum scalar = k_d n E_c$$

39

$$ce = Oc \text{ sen } (\beta/2) \text{ y } Ec2 = Ec1 = 2 ce$$

$$Ec1 = 2 Oc \text{ sen } (\beta/2) = 2 Oa \text{ sen } (\beta/2)$$

En el triángulo aOd, se obtiene el verdadero voltaje (el fasorial):

$$2 oa \text{ sen } (n \beta/2).$$

Reemplazando en la definición del factor de distribución:

$$K_d = \{2 oa \text{ sen } (n\beta/2)\} / [n \cdot 2 oa \text{ sen } (\beta/2)]$$

$$K_d = \text{sen } (n\beta/2) / n \text{ sen } (\beta/2)$$

Note que si $n = 1$, el factor de distribución es 1.

Los factores de paso y de distribución son menores que la unidad, ellos corrigen los errores de trabajar con sumatorias escalares las cuales inflan los resultados y se deben atenuar, lo cual se logra con dichos factores.

Tomando esto en consideración la fórmula para el voltaje rms inducido por fase se deberá corregir por la multiplicación de estos dos factores.

$$E_g = 4.44 N f \Phi K_p K_d$$

Al producto $((K_p)(K_d))$ se le conoce como factor de bobinado = K_w .

2.9 RESUMEN DE ECUACIONES

$$\eta_{rev/min} = 120 f / P$$

; $\eta_{(rev/min)}$: velocidad síncrona en revoluciones por minuto

;f:frecuencia eléctrica

;P:Número de polos

$$E_g = 4.44 N f \Phi$$

;Eg:voltaje generado

;Φ:flujo

;N:número de espiras por fase

;f:frecuencia eléctrica

$$K_p = \text{sen } (p/2)$$

;Kp:factor de paso

;p:ancho de bobina medido en grados eléctricos

$$K_d = \frac{\sin(n\beta/2)}{n \sin(\beta/2)} \quad ; K_d: \text{factor de distribución}$$

$$E_g = 4.44 N f \Phi K_p K_d$$

; E_g : voltaje generado

; Φ : flujo

; N : número de espiras por fase

; f : frecuencia eléctrica

; K_p : factor de paso

$$K_w = K_p K_d$$

; K_w : factor de bobinado

; K_d : factor de distribución

3. GENERADOR SÍNCRONO

3.1 INTRODUCCIÓN

Un generador síncrono es un dispositivo para convertir potencia mecánica de un motor primario en potencia eléctrica ca de voltaje y frecuencia específicos.

El término síncrono se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de esta máquina está sincronizada con su tasa mecánica de rotación de eje. El generador síncrono se utiliza para producir la gran mayoría de potencia eléctrica utilizada en todo el mundo.

Los generadores síncronos operan bajo la base de la ley de Faraday, es decir, si el flujo cambiante (proporcionado por el rotor) eslabona una bobina, se induce voltaje.

3.2 CONSTRUCCIÓN

Normalmente en un generador síncrono se aplica una corriente cd al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético en el rotor. Enseguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador.

Dos términos que se utilizan comúnmente para describir los devanados de una máquina son *devanados de campo* y *devanados del inducido*. En general, el término “devanados de campo” se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina y el término “devanados del inducido” se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal.

El rotor de un generador síncrono es en esencia un electroimán grande. Los polos magnéticos en el rotor pueden ser tanto salientes como no salientes. El término *salientes* significa proyectado hacia “afuera” o “prominente”, por lo tanto un polo saliente mostrado en la **Figura 13** es un polo magnético proyectado hacia fuera de la superficie del rotor. Por otro lado, un polo no saliente mostrado en la **Figura 14**, es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor (cilíndrico).

Por lo regular, los rotores de polos no salientes (cilíndricos) se utiliza para sistemas de altas velocidades (pocos polos 2 ó 4), 3600 ó 1800 rev/min para frecuencia de la red de 60Hz; 3000 o 1500 rev/min para frecuencias de 50 Hz, mientras los rotores de polos salientes se utiliza en medias y bajas velocidades (muchos polos de 4 a 12 o más).

Un ejemplo son las centrales térmicas (turboalternadores), se caracterizan porque las turbinas de vapor o gas desarrollan grandes velocidades y en consecuencia el rotor es cilíndrico (o no saliente); mientras que las centrales hidroeléctricas son de poca velocidad y los rotores de los alternadores son de polos salientes.

Debido a que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables, este se construye con láminas delgadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Figura 13. Rotor Polos Salientes

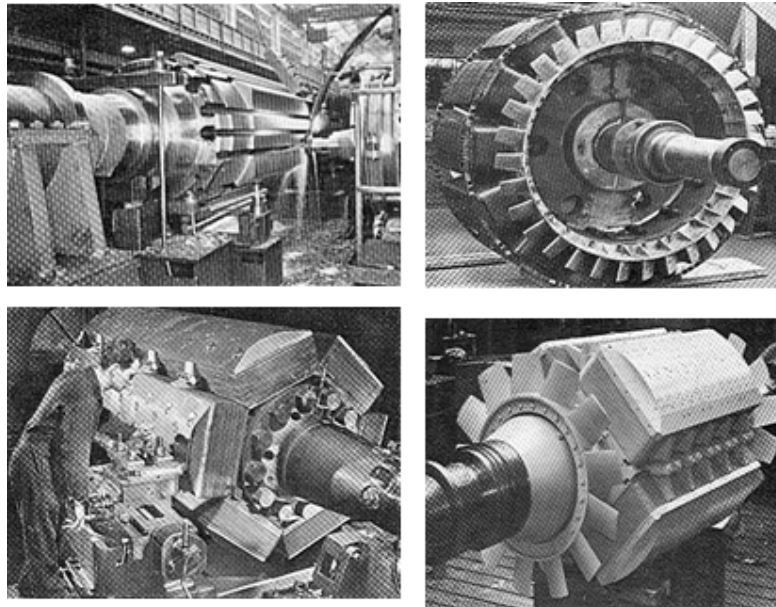
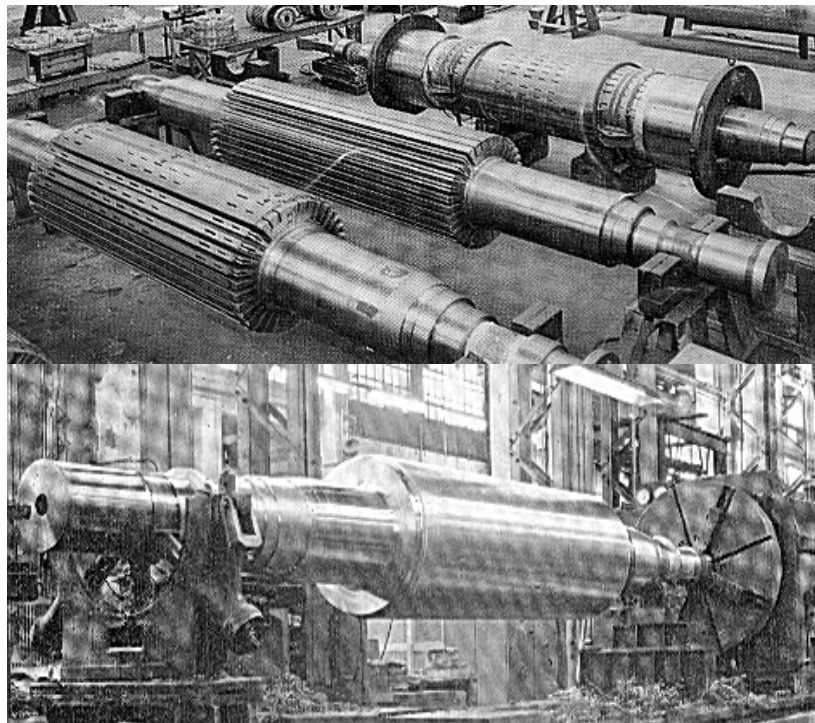


Figura 14. Rotor Polos no Salientes



Se debe suministrar una corriente cd al circuito del campo del rotor. Puesto que el rotor está girando, se requiere de un arreglo especial para que la potencia cd llegue a los devanados de campo. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia cd:

1. Suministrar al rotor la potencia cd desde una fuente externa cd por medio de anillos rozantes y escobillas.
2. Suministrar la potencia cd desde una fuente de potencia cd especial montada directamente en el eje del generador síncrono (Excitatriz).

Los anillos rozantes y las escobillas causan ciertos problemas cuando se utilizan para suministrar potencia cd a los devanados de campo de una máquina síncrona; incrementan la necesidad de mantenimiento que requiere la máquina debido a que el desgaste de las escobillas debe ser revisado regularmente. Además la caída de voltaje en las escobillas puede ser la causa de pérdidas significativas de potencia en las máquinas que tienen corrientes de campo mas grandes. A pesar de esto los anillos rozantes y las escobillas se utilizan en todas las máquinas síncronas pequeñas, ya que no hay otro método para suministrar corriente de campo cd que sea mas económico.

En los generadores y motores más grandes se utilizan excitadores o excitatrices sin escobillas para suministrar a la máquina corriente de campo cd. Algunos generadores síncronos que incluyen este tipo de excitadores, también tienen anillos rozantes y escobillas, por si la excitatriz falla, puede ser reemplazada provisionalmente por una fuente auxiliar de corriente de campo cd.

Las partes más importantes de una máquina síncrona funcionando como generador o motor son:

- Estator
- Rotor
- Jaula Amortiguadora

3.2.1 Estator

***Carcasa o caja metálica**

Se encuentra en el estator, el cual está constituido por un conjunto de láminas provistas de ranuras en las que se colocan los aislamientos para recibir los conductores de las bobinas del inducido. Su función es la protección de las componentes internas contra agentes del medio ambiente (polvo, vapor partículas en suspensión y objetos metálicos), además de ser un sistema de soporte del núcleo magnético y del devanado del inducido. Algunos tipos de carcasas son mostradas en la **Figura15**.

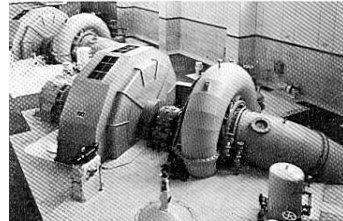
***Núcleo de armadura**

Es un conjunto de laminaciones de acero al silicio. Generalmente el espesor es de 0.25 a 0.40 mm. El núcleo de armadura se fija a la carcasa, por las salientes de la laminación en forma de cola de paloma. Las ranuras del núcleo de armadura pueden ser axiales ó sesgadas; las ranuras sesgadas reducen el efecto de pulsación del flujo magnético y de las armónicas en el voltaje inducido. El núcleo de armadura se muestra en la **Figura 16**.

Figura 15. Tipos de Carcasas



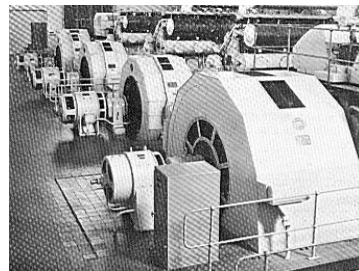
Turbo generador (cerrada)



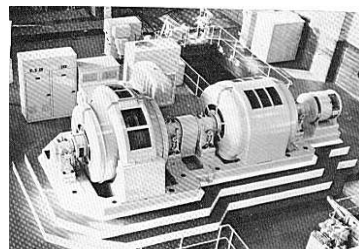
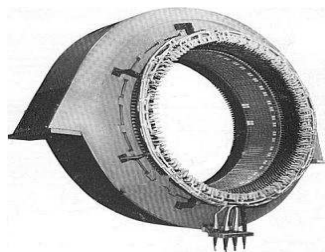
Hidro generador (cerrada)



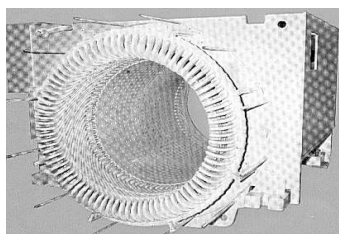
Hidro generador vertical (cerrada)



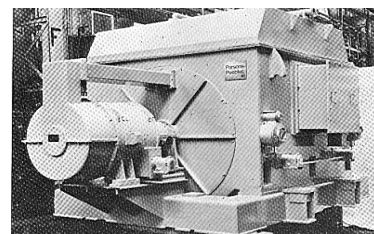
Generador de planta diesel(cerrda)



Grupo motor generador (abierta)

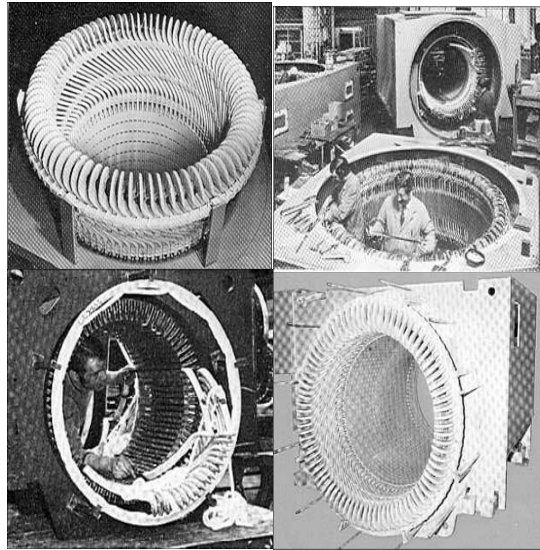


Generador de 5000 Kw (cerrada)



Generador de 10MVA 11 kv (cerrada)

Figura 16. Núcleo de Armadura

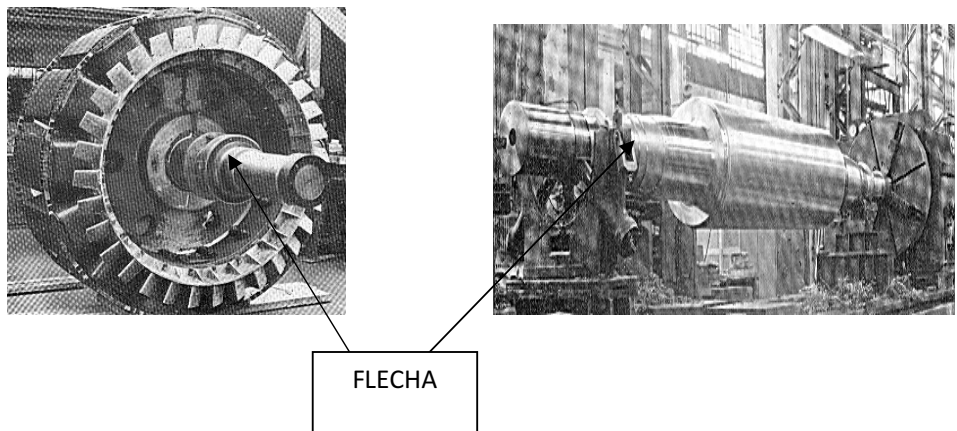


3.2.2 Rotor

*Flecha

Es la parte del rotor que soporta los elementos de giro.

Figura 17. Flecha



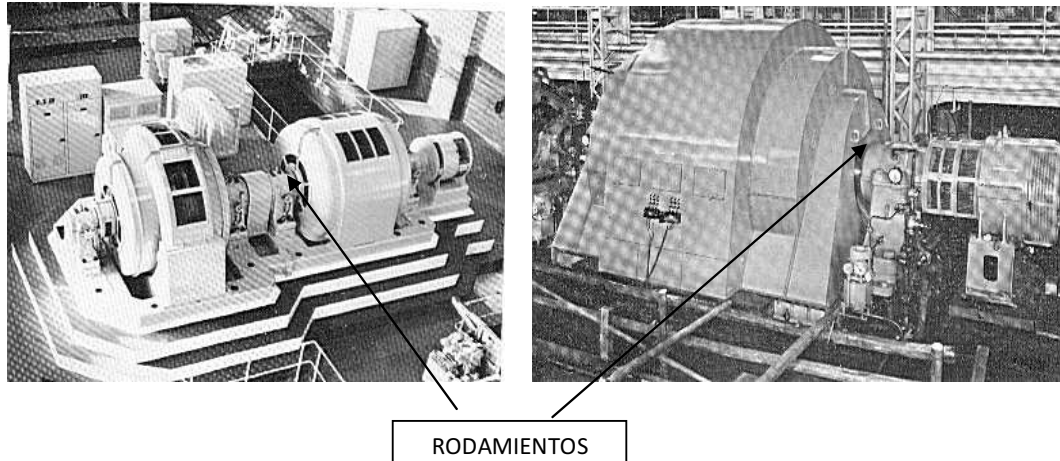
*Rodamientos

En máquinas de capacidad baja se utilizan frecuentemente rodamientos de bolas y rodillos prelubricados.

En chumaceras de generadores de capacidad grande se emplea colchón de aceite a

presión para reducir las pérdidas por fricción. Los rodamientos se muestran en la **Figura 18**.

Figura 18. Rodamientos

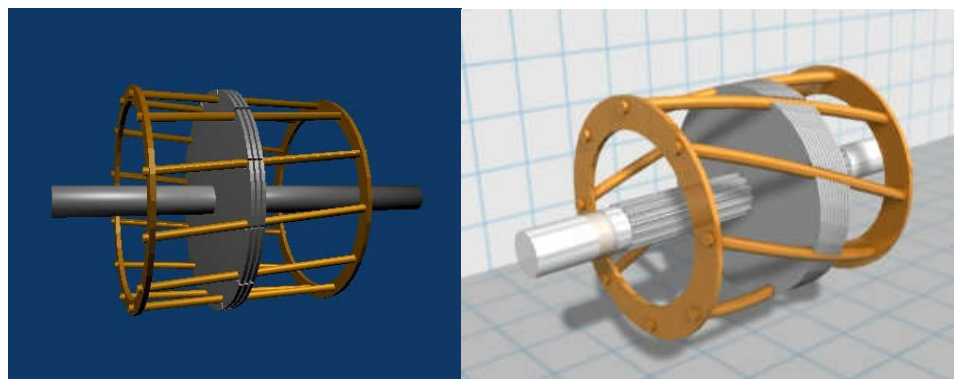


3.2.3 JAULA AMORTIGUADORA

Es un componente especial útil en el caso desequilibrado o en servicio en paralelo de alternadores. Se unen las piezas polares macizas en ambos lados frontales con un anillo de cobre, formando una jaula. En el caso de polos de chapas, se introduce en las piezas polares, unas barras conductoras adicionales que se unen igualmente con un anillo de cobre,

En el caso de motores síncronos, esta jaula es importante en el momento de arranque. La jaula amortiguadora se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19. Jaula amortiguadora



3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO

El voltaje E_g es el voltaje interno inducido en una fase de un generador síncrono. Sin embargo, este voltaje no es normalmente el voltaje que se presenta en los terminales del generador. De hecho, el único momento en el que el voltaje interno E_g es igual al voltaje de salida V_ϕ de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina.

¿Por qué el voltaje de salida V_ϕ de una fase no es igual a E_g ?

Hay varios factores que ocasionan la diferencia que hay entre E_g y V_ϕ :

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada *reacción del inducido*.

Normalmente es el efecto mayor; cuando gira el rotor de un generador síncrono, se induce un voltaje E_g en los devanados del estator del generador. Si se añade una carga a los terminales del generador, una corriente fluye por la armadura (estator). Ese flujo de corriente produce su propio campo magnético en la máquina. Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor y altera el voltaje de fase resultante. A este fenómeno, se le llama reacción de inducido, porque la corriente del inducido (estator) afecta el campo magnético que lo produjo en primera instancia.

¿Cómo se pueden modelar los efectos de reacción del inducido en el voltaje de fase V_ϕ ?

El efecto de reacción de inducido se modela como un voltaje E_{ra} , también conocido como voltaje de reacción de armadura, el cual está atrasado 90 grados con respecto a la corriente de armadura I_a , y es directamente proporcional a esta. Si X es la constante de proporcionalidad, entonces el voltaje de reacción de inducido se puede expresar como:

$$E_{ra} = -jX \cdot I_a$$

Por lo tanto, el voltaje en una fase es:

$$V_\phi = E_g - jX \cdot I_a$$

Por lo tanto, se puede modelar inmediatamente, el voltaje de reacción del inducido como un inductor en serie con un voltaje interno generado.

2. La autoinductancia de las bobinas del inducido y la resistencia de las bobinas del inducido.

Además de los efectos de reacción del inducido, las bobinas del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si se llama L_a a la autoinductancia del estator (y se llama X_a a su reactancia correspondiente), mientras que a la resistencia del estator se le llama R_a , entonces la diferencia total entre E_g y V_ϕ está dada por:

$$V_\phi = E_g - jX \cdot I_a - jX_a \cdot I_a - R_a \cdot I_a$$

Tanto los efectos de reacción del inducido como la autoinductancia en la máquina se representan por medio de reactancias y se acostumbran combinarlas en una sola llamada reactancia síncrona de la máquina : X_s

$$X_s = X + X_a$$

Por lo tanto la ecuación final que describe V_ϕ es :

$$V_\phi = E_g - jX_s I_a - R_a I_a$$

El circuito equivalente de un generador síncrono conectado en **Y** es el mostrado en la **Figura 20**.

Figura 20. Circuito equivalente Generador Síncrono en Y

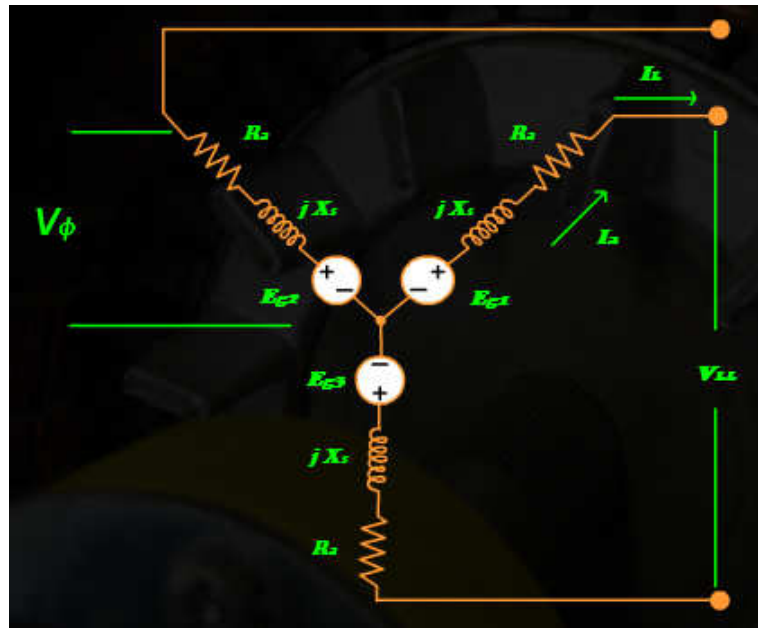
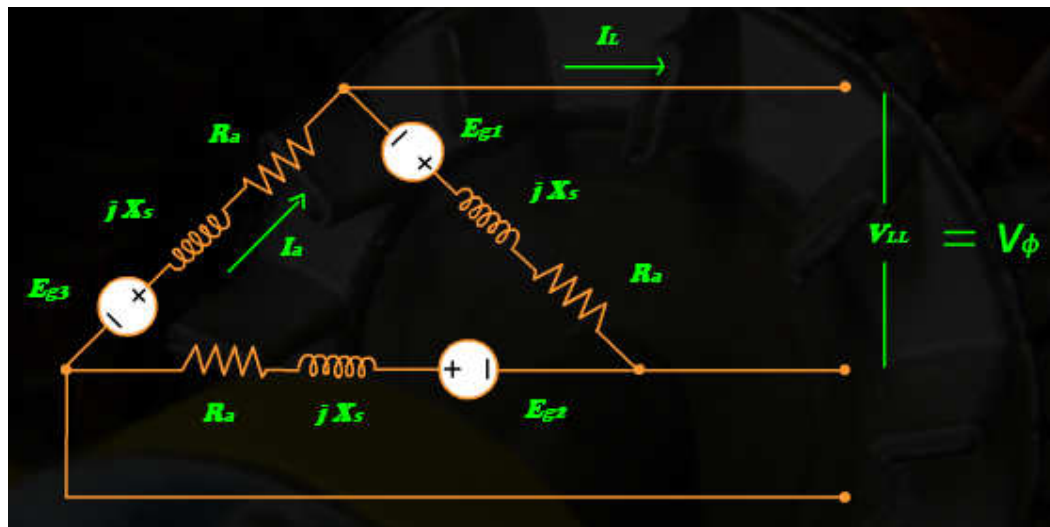


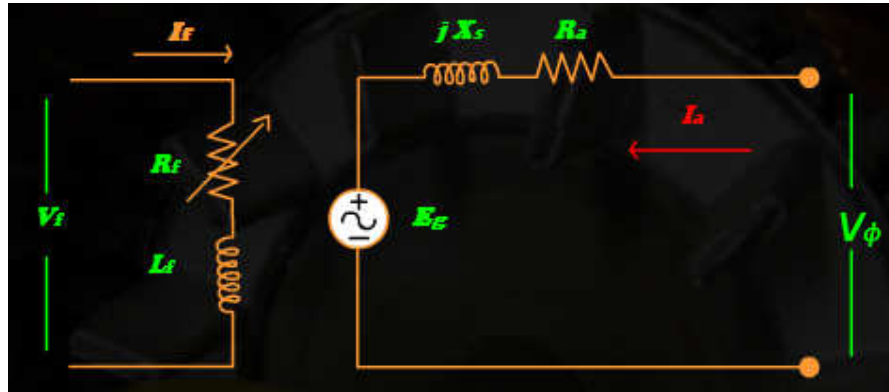
Figura 21. Circuito equivalente Generador Síncrono en Δ



El circuito equivalente de un generador síncrono conectado en Δ es el mostrado en la **Figura 21**.

El hecho de que las tres fases de un generador síncrono sean idénticas en todos sus aspectos menos en el ángulo de fase, lleva a la utilización de un circuito equivalente por fase. El circuito equivalente por fase de un generador síncrono es el mostrado en la **Figura 22**.

Figura 22. Circuito Equivalente por fase del Generador Síncrono



Dónde:

R_a : resistencia del inducido

X_s : reactancia síncrona de la máquina

I_a : corriente del inducido

V_ϕ : voltaje en terminales de la máquina por fase.

E_g : voltaje inducido por fase.

$$X_s = X + X_a$$

X : constante de proporcionalidad

X_a : reactancia propia de dispersión del inducido.

$$V_\phi = E_g - jX_s \cdot I_a - R_a \cdot I_a$$

$$V_\phi = E_g - I_a (R_a + jX_s)$$

Organizando el circuito en términos de impedancias tenemos el mostrado en la **Figura 23**.

Figura 23. Circuito en términos de impedancias



Ecuaciones implicadas en el análisis por fase del generador síncrono:

$$X_s = X + X_a$$

$$V_\phi = E_g - I_a (R_a + jX_s)$$

Si:

$$Z_s = R_a + jX_s$$

Tenemos:

$$V_\phi = E_g - Z_s I_a$$

En términos de ángulos, tomando como referencia a V_ϕ a 0 grados, teniendo en cuenta que: el coseno del ángulo de I_a , $\{\theta\}$, se define como el factor de potencia, el ángulo entre V_ϕ y E_g , $\{\delta\}$, es el ángulo de potencia o de carga y ϕ es el ángulo de la impedancia:

$$V_\phi \angle 0^\circ = (E_g \angle \delta) - (Z_s \angle \phi)(I_a \angle \theta)$$

$$V_\phi \angle 0^\circ = (E_g \angle \delta) - Z_s I_a \angle (\theta + \phi)$$

cos θ = factor de potencia

$$P_o = V_\phi I_a (\cos \theta)$$

Po: potencia de salida por fase

Se debe tener presente un factor importante cuando se utiliza un circuito equivalente por fase:

Las tres fases tienen los mismos voltajes y corrientes, sólo cuando las cargas conectadas a ellas están balanceadas. Si las cargas del generador no están balanceadas, se requieren otras técnicas de análisis para determinar totalmente el circuito equivalente por fase se debe tener en cuenta:

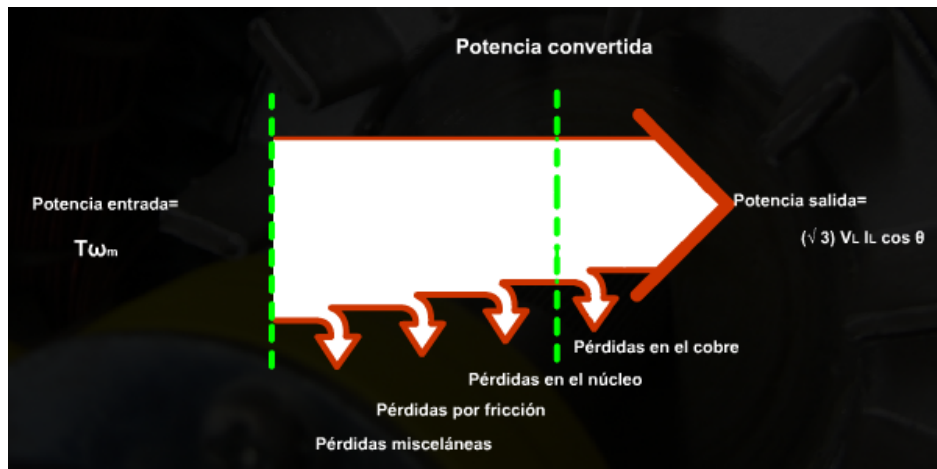
1. Para máquinas conectadas en delta Δ , el voltaje de fase es el voltaje línea-línea, mientras que la corriente de fase es la corriente de línea dividida entre $\sqrt{3}$
2. para máquinas conectadas en Y , el voltaje de fase es igual al voltaje línea-línea dividido entre $\sqrt{3}$, mientras que la corriente de fase es igual a la de línea-línea.

3.4 POTENCIA EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS

Un generador convierte potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica u otro equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe tener la propiedad básica de mantener su velocidad constante sin importar la demanda de potencia. Si esto no se cumple, entonces la frecuencia resultante del sistema de potencia no sería constante.

No toda la potencia mecánica que entra a un generador síncrono se convierte en potencia eléctrica que sale de la máquina. La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida representa las pérdidas de la máquina. En la **Figura 24** se muestra las diferentes pérdidas de potencia.

Figura 24. Diagrama de pérdidas de potencia



En los sistemas de corriente alterna se tienen definidas las potencias: activa o real (P), reactiva (Q) y aparente (S), las cuales para sistemas monofásicos se expresan como:

$$S = V I \quad (1)$$

$$P = V I \cos (\theta) \quad (2)$$

$$Q = V I \sin (\theta)$$

Donde θ es el ángulo entre los fasores V e I.

En sistemas trifásicos equilibrados e independiente de como esté conectada la carga (Y o Delta), se tienen las siguientes relaciones:

$$S = \sqrt{3} V_{LL} I_L \quad (3) \quad ; V_{LL}: \text{voltaje línea -línea}$$

$$P = \sqrt{3} V_{LL} I_L \cos (\theta) \quad (4) \quad ; I_L: \text{corriente de línea}$$

$$Q = \sqrt{3} V_{LL} I_L \sin (\theta)$$

Para obtener la corriente nominal por fase de una máquina síncrona trifásica se despeja de **(3) o (4)**, la corriente de línea según los datos conocidos, luego teniendo en cuenta la conexión de la máquina bajo estudio, se determina la corriente del inducido **I_a** por fase (devanado):

En Y :

$$I_a = I_L$$

En Delta Δ :

$$I_a = I_L / \sqrt{3}$$

Otra forma de proceder igualmente válida es trabajar por fase desde el principio. Se toma la potencia total (S o P) y se divide entre el número de fases para obtener la potencia por fase. Según la conexión se obtiene **V_ϕ** por fase y no **V_{LL}** .

En Y :

$$V_\phi = V_{LL} / \sqrt{3}$$

En Delta Δ :

$$V_\phi = V_{LL}$$

Se pueden utilizar según el dato de potencia conocido, para obtener directamente la corriente de fase.

La eficiencia de un alternador esta definida como el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada:

$$\eta = P_o / P_{ent}$$

Las pérdidas en el cobre se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$P_{cu} = m I_a^2 R_a \quad ; \quad m = \text{número de fases}$$

Para determinar las potencias, electromagnética y de salida son:

$$P_g = m (E_g I_a \cos(\beta)) \quad ; \beta: \text{ángulo entre los fasores } E_g \text{ y } I_a$$

$$P_o = m (V_\phi I_a \cos(\Theta)) \quad ; \Theta: \text{ángulo entre los fasores } V_\phi \text{ e } I_a$$

Para determinar la potencia reactiva (Q) y aparente (S) a la salida se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_o = m (E_g I_a \sin(\Theta))$$

$$S_o = m (V_\phi I_a)$$

En ocasiones se desprecia R_a , lo que ocasionaría que $P_g = P_o$, pero $Q_o \neq Q_g$, en consecuencia la potencia a la salida quedaría:

$$P_g = P_o = m (V_\phi E_g \sin(\delta) / X_s)$$

3.4.1 Resumen ecuaciones potencias

$S = V I$; potencia aparente generador monofásico
$P = V I \cos(\theta)$; potencia activa generador monofásico
$Q = V I \sin(\theta)$; potencia reactiva generador monofásico
$S = \sqrt{3} V_{LL} I_L$; potencia aparente generador trifásico
$P = \sqrt{3} V_{LL} I_L \cos(\theta)$; potencia activa generador trifásico
$Q = \sqrt{3} V_{LL} I_L \sin(\theta)$; potencia reactiva generador trifásico
$\eta = P_o / P_{ent}$; eficiencia
$P_o = m (V_\phi I_a \cos(\theta))$; potencia de salida activa del generador
$Q_o = m (E_g I_a \sin(\theta))$; potencia de salida reactiva del generador
$S_o = m (V_\phi I_a)$; potencia de salida aparente del generador
$P_{cu} = m I_a^2 R_a$; pérdidas en el cobre

3.5 MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DEL GENERADOR SÍNCRONO

El circuito equivalente de un generador síncrono consta de tres parámetros, cuyo valor se debe determinar para describir completamente el comportamiento de un generador síncrono real, a través de su circuito equivalente:

3.5.1 La resistencia del inducido o armadura Para determinar la resistencia del inducido se puede utilizar un puente de wheastone o, aplicando un voltaje cd determinado entre dos fases de la máquina y se mide la corriente que se origina.

Para calcular la resistencia por fase se debe tener en cuenta el efecto piel y el tipo de conexión.

Si el generador está conectado en **Y** (ver **Figura 25**) se procede de la siguiente manera:

$$R_{cd} = V_{cd} / 2 I_{cd}$$

La resistencia a la corriente alterna, asumiendo 1.3 como factor que tiene en cuenta el efecto piel, se tiene:

$$R_a = 0.65 V_{cd} / I_{cd}$$

Para conexión en delta **Δ** se realiza la medición como lo indica la **Figura 26**

$$R_{cd} = 1.5 V_{cd} / I_{cd}$$

La resistencia del inducido será:

$$R_a = 1.95 V_{cd} / I_{cd}$$

Figura 25. Esquema medición resistencia inducido en Y

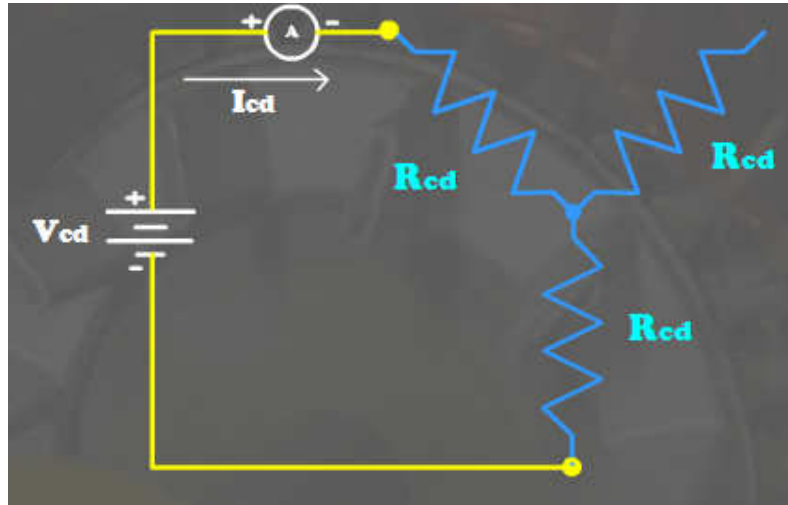
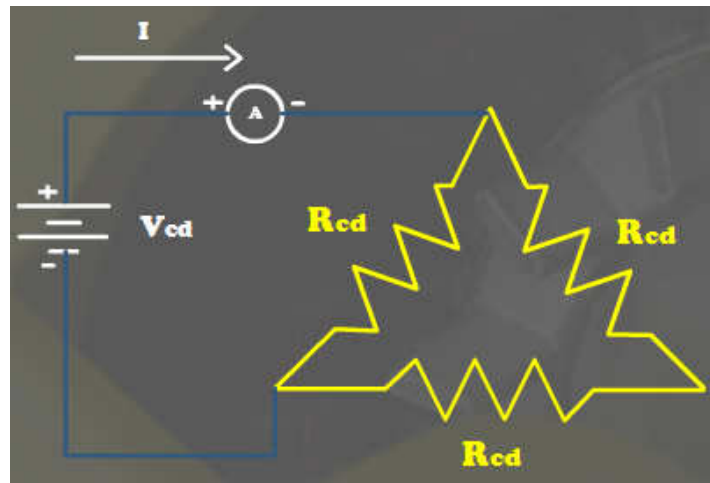


Figura 26. Esquema medición resistencia inducido en Δ .



3.5.2 La impedancia síncrona Para determinar la impedancia síncrona es necesario realizar dos pruebas:

***Prueba en vacío**

Para realizar esta prueba, el generador se hace girar a velocidad nominal, se desconectan los terminales de cualquier carga. A partir de cero "0" se empieza a incrementar gradualmente por etapas la corriente de campo y se mide el voltaje en los terminales en cada etapa, el cual será obviamente el voltaje inducido E_g por fase; si la máquina está conectada en delta Δ , el voltaje V_{LL} medido será el mismo de fase; si la

máquina está conectada en **Y** el voltaje por fase será el medido dividido entre $\sqrt{3}$. El esquema para la prueba en vacío es el mostrado en la **Figura 27**.

De la prueba obtendremos valores de: I_f , V_{LL} y E_g se calcula según la conexión.

La curva característica de esta prueba es la mostrada en la **Figura 28**

como la máquina está en vacío $E_g = V_\phi$

***Prueba de cortocircuito**

La relación de cortocircuito de un generador se define como: la relación entre la corriente de campo requerida para el voltaje nominal en circuito abierto, y la corriente de campo requerida para la corriente del inducido nominal en cortocircuito.

El esquema para la prueba de cortocircuito es el mostrado en la **Figura 29**.

Se pone a girar la máquina a velocidad nominal y se deja constante; con los terminales del inducido en cortocircuito; se empieza a variar desde cero la corriente de campo hasta obtener la corriente de línea nominal.

Se designa como I_1 al promedio de los 3 Amperímetros.

Se obtiene entonces: I_f , I_1 , $I_{a(fase)}$

Para obtener $I_{a(fase)}$, que es la corriente del inducido por fase, esta depende de la conexión de la máquina, si es delta, se divide I_1 entre $\sqrt{3}$; y si es **Y** entonces $I_a = I_1$.

La curva característica de esta prueba es la mostrada en la **Figura 30**.

Es costumbre colocar sobre un mismo gráfico las características en vacío y de cortocircuito, dado que la variable independiente I_f es igual para ambas. Se debe tener dos ejes verticales, uno para voltajes inducidos y el otro para corrientes de cortocircuitos. Así como lo muestra la **Figura 31**.

La magnitud de la impedancia síncrona, se obtiene de la siguiente expresión:

$$Z_s = E_{g1} / I_{a1} \quad (\text{En cortocircuito})$$

Para una corriente de campo igual I_{fn} , se mide el voltaje en vacío y la corriente de cortocircuito (en ambos casos tener valores por fase), la relación de ellos dará la magnitud de la impedancia síncrona.

$$Z_s = E_{g1} / I_{a1}$$

Figura 27. Esquema prueba en vacío

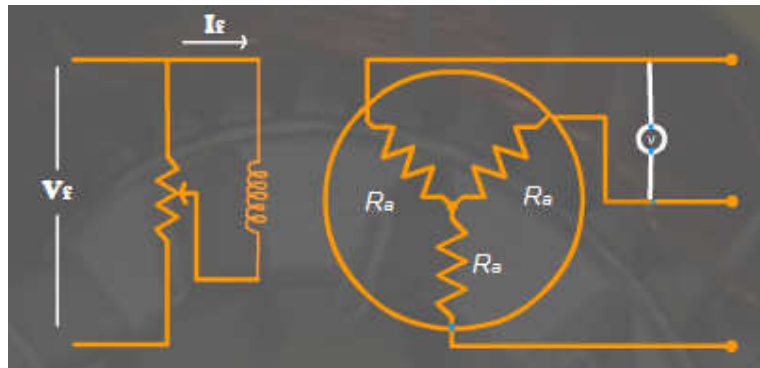


Figura 28. Curva característica prueba en vacío

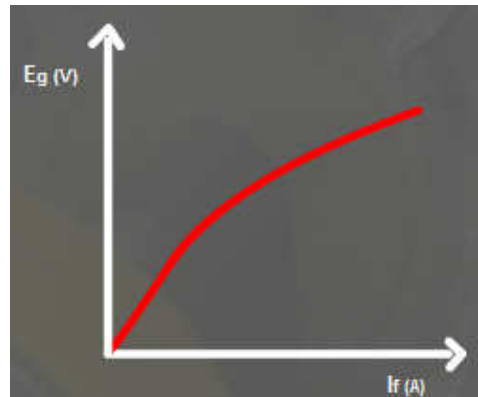


Figura 29. Esquema prueba cortocircuito

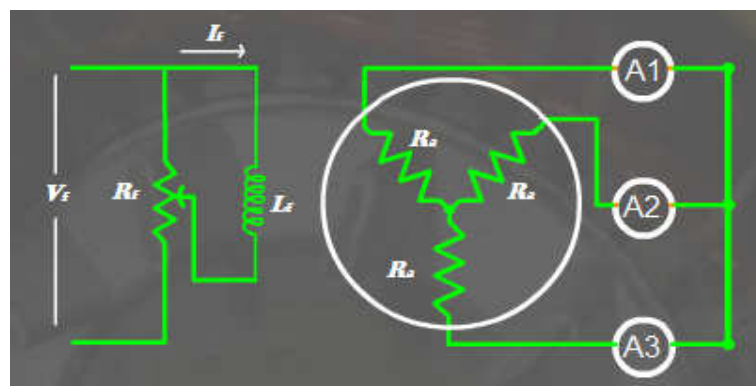
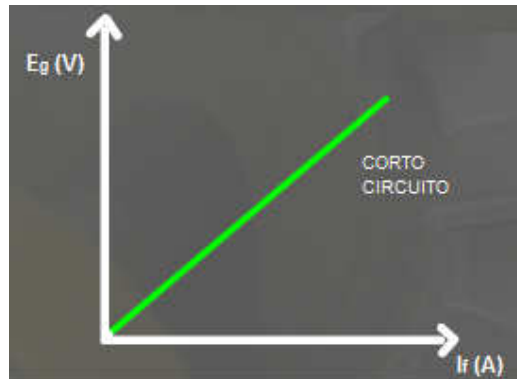


Figura 30. Curva característica. Prueba de cortocircuito



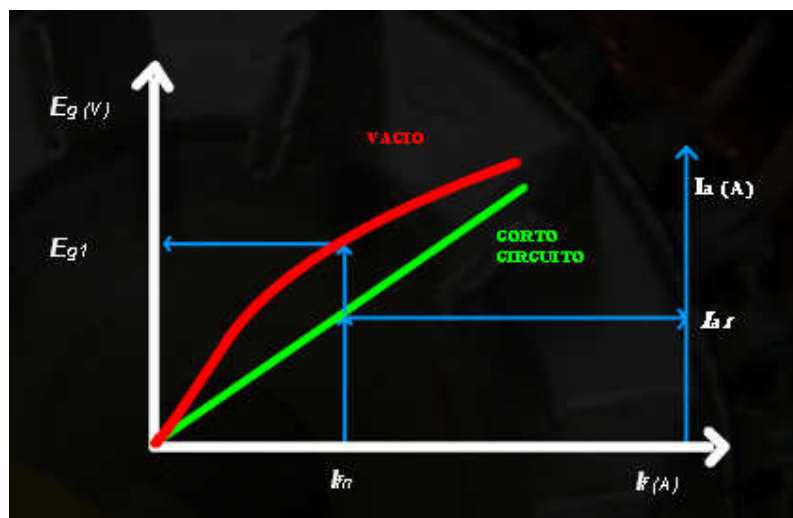
3.5.3 La reactancia síncrona Para determinar la reactancia síncrona, se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$X_s = \sqrt{(E_g / I_a)^2 - R_a^2} \quad ; \text{ los valores son por fase}$$

o de una forma aproximada

$$X_s = E_g / I_a \quad ; \text{ los valores son por fase}$$

Figura 31. Curva característica. Prueba en vacío y prueba de cortocircuito



3.6 DIAGRAMA FASORIAL DE UN GENERADOR SÍNCRONO:

Debido a que los voltajes en un generador síncrono son voltajes ca, normalmente se expresan como fasores. Y puesto que los fasores tienen tanto magnitud como ángulo, la relación entre ellos se debe expresar en una gráfica bidimensional. Cuando se hace una gráfica de los voltajes dentro de una fase (E_g , V_ϕ ; $jX_s I_a$ y $R_a I_a$) y la corriente I_a en la fase de tal forma que se muestren las relaciones entre ellos, la gráfica resultante se llama diagrama fasorial.

Como ejemplo se analizan diferentes casos, según sea la carga que tiene que alimentar el generador. El factor de potencia lo determina el usuario.

3.6.1 Diagrama de fase con factor de potencia = 1

($\theta = 0$) carga puramente resistiva. Ver **Figura 32**.

Se nota que $E_g > V_\phi$, además E_g adelanta a V_ϕ , es decir δ es positivo.

3.6.2 Diagrama de fase con factor de potencia en atraso.

Carga puramente inductiva. Ver **Figura 33**

De nuevo $E_g > V_\phi$ y δ es positivo.

3.6.3 Diagrama de fase con factor de potencia en adelanto.

Carga puramente capacitiva. Ver **Figura 34**.

E_g puede llegar a ser menor que V_ϕ , lo cuál daría regulaciones negativas; es decir, a medida que se aumente carga capacitiva se tendrá aumentos de voltaje respecto al voltaje de vacío. Opuesto a lo que ocurre en generadores cd y en alternadores ante cargas resistivas o inductivas.

También se observa que E_g adelanta a V_ϕ como en los casos anteriores, lo cual se podría convertir en una conclusión general para los alternadores: δ es positivo.

Figura 32. Diagrama de fase con FP=1

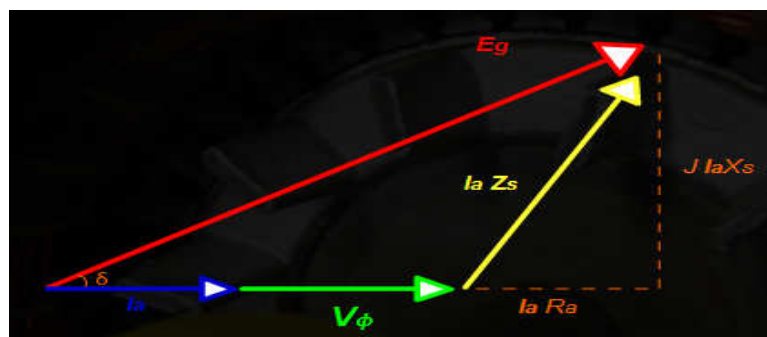


Figura 33. Diagrama de fase con FP en atraso

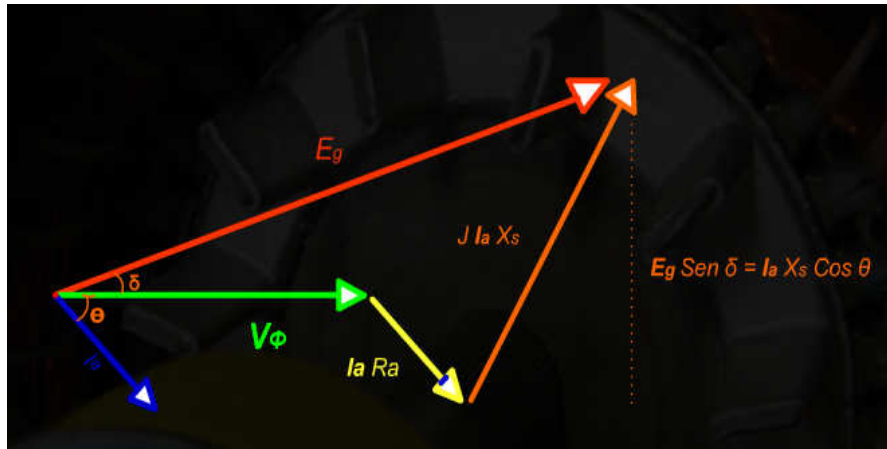
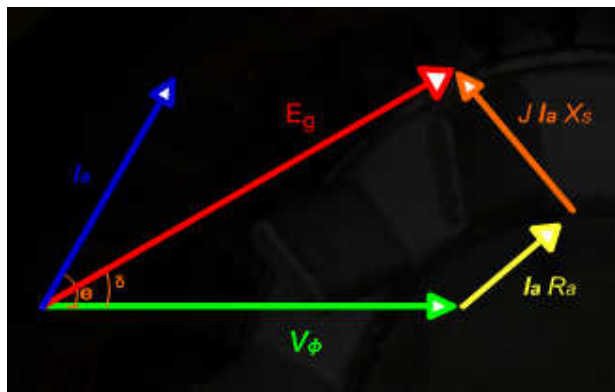


Figura 34. Diagrama de fase con FP en adelanto



3.7 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO

Los generadores síncronos son por definición síncronos, lo que quiere decir que la frecuencia eléctrica se sincroniza con la velocidad de rotación del generador. El rotor de un generador síncrono consta de un electroimán al que se le suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en la dirección radial del rotor. Ahora, la velocidad de rotación de los campos magnéticos en la máquina está relacionada con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la ecuación

$$f_e = \eta_m P / 120$$

f_e : frecuencia eléctrica en Hertz

η_m : velocidad mecánica del campo magnético en rev/min (igual a la velocidad del rotor en una máquina síncrona)

P = número de polos

Debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético. Esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante. La potencia eléctrica se genera a 50 o 60 Hz, por lo que el generador debe girar a una velocidad fija dependiendo del número de polos de la máquina. Por ejemplo, para generar una potencia de 60 Hz en una máquina de dos polos, el rotor debe girar a 3600 r/min. Para generar una potencia de 50Hz en una máquina de cuatro polos, el rotor debe girar a 1500 r/min. La tasa de rotación requerida para cierta frecuencia siempre se puede calcular a partir de la ecuación anterior.

3.8 RESUMEN DE ECUACIONES

$X_s = X + X_a$; X: constante de proporcionalidad
;Xa: reactancia propia de dispersión del inducido.

$V_\phi = E_g - I_a (R_a + jX_s)$;voltaje de fase

$Z_s = R_a + jX_s$;Impedancia síncrona

$V_\phi = E_g - Z_s . I_a$;voltaje de fase en términos de impedancia

$S = V I$;potencia aparente generador monofásico

$P = V I \cos (\theta)$;potencia activa generador monofásico

$Q = V I \sin (\theta)$;potencia reactiva generador monofásico

$S = \sqrt{3} V_{LL} I_L$;potencia aparente generador trifásico

$P = \sqrt{3} V_{LL} I_L \cos (\theta)$;potencia activa generador trifásico

$Q = \sqrt{3} V_{LL} I_L \sin (\theta)$;potencia reactiva generador trifásico

$\eta = P_o / P_{ent}$;eficiencia

$P_o = m (V_\phi I_a \cos(\Theta))$;potencia de salida activa del generador

$Q_o = m (E_g I_a \sin(\Theta))$;potencia de salida reactiva del generador

$S_o = m (V_\phi . I_a)$;potencia de salida aparente del generador

$P_{cu} = m I_a^2 R_a$;pérdidas en el cobre

4. MOTOR SÍNCRONO

4.1 INTRODUCCIÓN

Un motor síncrono tiene el mismo aspecto constructivo que un generador síncrono y de hecho un generador síncrono podría trabajar como motor síncrono alimentándolo con corriente alterna y excitándolo con corriente directa.

El caso de un motor síncrono la estructura del campo (rotor) se alimenta con corriente directa en forma semejante al caso del generador; mientras que el devanado del estator se conecta a una alimentación de corriente alterna. Por lo tanto se requieren dos fuentes de alimentación; una de corriente alterna y otro de corriente directa. La de corriente alterna para accionar la armadura y la de corriente directa para excitar el campo-

La corriente directa para la excitación del rotor se puede tomar de una fuente independiente, o bien en el caso de motores que operan con alta velocidad con excitatrices acopladas directamente al eje del rotor.

La velocidad síncrona del motor esta dada por:

$$\omega_{sin} = 120 f_e / P$$

; f_e : frecuencia eléctrica
; P : numero de polos

Las partes esenciales de un motor síncrono trifásico son:

- a. El núcleo laminado del estator en donde se aloja el devanado trifásico de corriente alterna-
- b. La estructura giratoria formada por el estator en donde se alojan las bobinas del devanado de campo que se excita con corriente directa. Con su flecha correspondiente y los anillos rozantes montados en esta. El porta escobillas y escobillas para conexión a la fuente de excitación en la misma forma que los generadores.
En el rotor, en algunas ocasiones, se alojan en los polos los llamados devanados de amortiguamiento.
- c. Dos apoyos con sus chumaceras para soportar el eje del rotor.

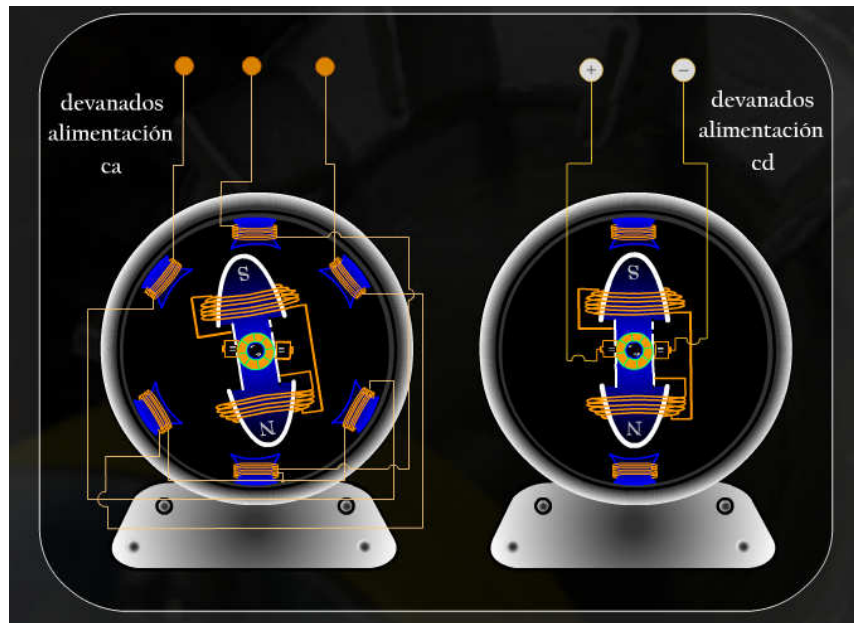
4.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

En la **Figura 35** se muestra un motor síncrono de dos polos.

La corriente de campo I_f del motor produce un campo magnético de estado estacionario B_r . Un conjunto trifásico de voltajes se aplica al estator de la máquina, que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados.

Un conjunto trifásico de corrientes en el devanado del inducido produce un campo magnético uniforme rotacional \mathbf{B}_s . Entonces, hay dos campos magnéticos presentes en la máquina. Donde el campo rotórico tenderá a alinearse con el campo estatórico. Puesto que el campo magnético del estator es rotante, el campo magnético del rotor (y el rotor en si mismo) tratará constantemente de emparejarse con él. Cuanto mayor sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta cierto máximo), mayor es el par sobre el rotor de la máquina. El principio básico de operación del motor síncrono es que el rotor “persigue” el campo magnético rotante del estator alrededor de un círculo sin emparejarse del todo con él.

Figura 35. Motor síncrono de dos polos



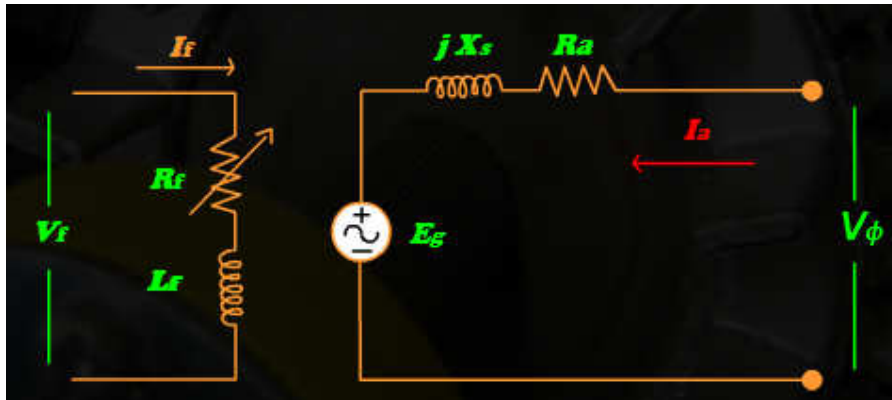
4.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

Un motor síncrono es igual en todos sus aspectos a un generador síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia en la máquina es invertida. Puesto que la dirección del flujo de potencia de la máquina está invertida, cabe esperar que también se invierta la dirección del flujo de corriente en el estator del motor. El circuito equivalente de un motor síncrono es exactamente igual al del generador síncrono, excepto que la dirección de referencia \mathbf{I}_a está invertida. El circuito equivalente del motor síncrono por fase se muestra en la **Figura 36**.

Debido al cambio de dirección de \mathbf{I}_a , cambia también la ecuación correspondiente a la ley de voltajes de kirchhoff para el circuito equivalente por fase. Por lo tanto:

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_g + \mathbf{JX}_s \mathbf{I}_a + \mathbf{R}_a \mathbf{I}_a$$

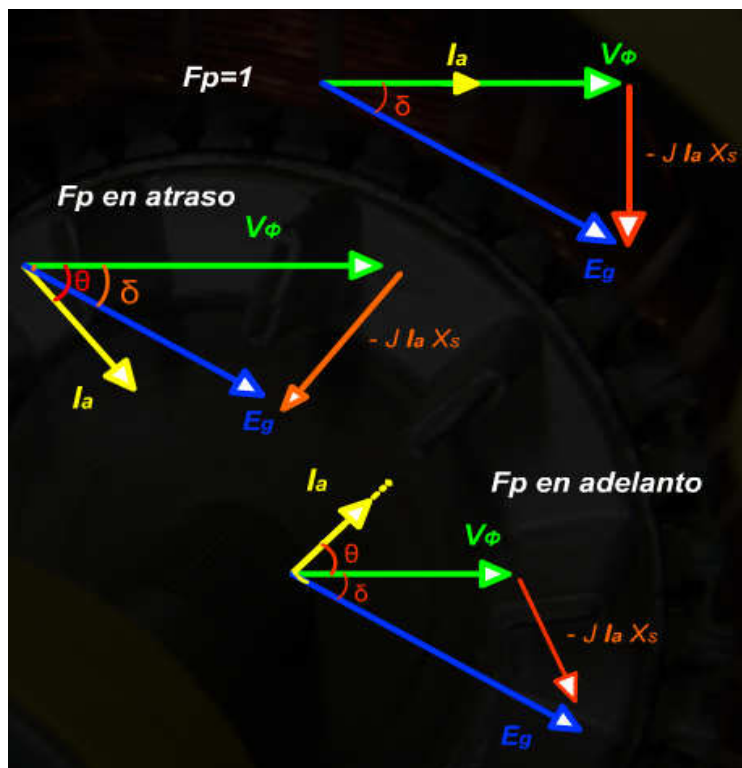
Figura 36. Circuito equivalente por fase del Motor síncrono



4.4 DIAGRAMA DE FASE

Una máquina trabaja como motor si el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente se encuentra en el primer o cuarto cuadrante, ya que en este caso el factor de potencia es positivo y entonces la potencia eléctrica de entrada al motor es positiva. En los siguientes diagramas fasoriales (**Figura 37**) se muestran diferentes condiciones de operación del motor considerando la resistencia de armadura despreciable.

Figura 37. Diagramas fasoriales Motor síncrono

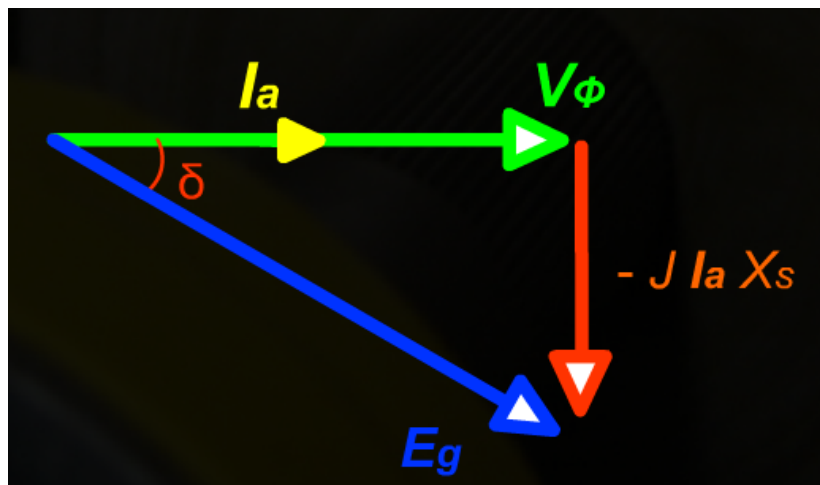


Se puede notar de los tres diagramas anteriores se asumió $R_a = 0$. El voltaje E_g es el que se induce en la armadura (estator) por el flujo debido únicamente a la corriente de campo, es decir, en ausencia de cualquier corriente en la armadura, por lo que la magnitud de E_g depende solo de la corriente de campo I_f .

También se puede observar que el ángulo de fase θ (ángulo cuyo coseno es el factor de potencia) depende de la excitación en el campo en el sentido cualitativo o el voltaje de armadura E_g o la corriente de campo I_f , ya que aumentando uno se incrementa el otro y viceversa.

Para una carga mecánica que demanda una cierta potencia, el factor de potencia del motor se puede ajustar variando la excitación en el campo. Por ejemplo si se desea que un motor síncrono que acciona una cierta carga opere con una corriente a un factor de potencia unitario, entonces se debe elaborar un diagrama vectorial como el de la **Figura 38**; o bien por un procedimiento analítico similar se calcula la excitación requerida para cumplir con tal requerimiento.

Figura 38. Diagrama vectorial Motor Síncrono



Esto se conoce como la excitación normal para una carga. Si la excitación de campo es mayor que esto, se dice que el motor está “sobreexcitado” y entonces la corriente de armadura “ I_a ” esta adelantada con respecto al voltaje de fase, se dice que el motor opera “subexcitado”.

4.5 EFECTO DE LA CARGA EN LOS MOTORES SÍNCRONOS

Dado que un motor síncrono no tiene par de arranque propio, inicialmente debe ser accionado por algún medio externo como si se tratara de un generador y se sincroniza con el campo producido por la fuente de alimentación.

En el instante de la sincronización la fuerza electromotriz “ fem ” inducida en el circuito del estator del motor, es igual al voltaje de línea aplicado en sus terminales V_L pero de sentido opuesto vectorialmente.

Dado que $V_L = E_g$ el voltaje resultante es cero y por lo tanto no hay corriente de armadura y tampoco carga y pérdidas que alimentar.

Después de la sincronización el medio de accionamiento externo se retira y el motor tiene la tendencia a bajar sus características de operación, es decir a frenarse, no obstante no hay cambio en la velocidad, pero hay un desplazamiento en la posición relativa del rotor continuando su operación a la velocidad de sincronismo. El rotor se desplaza ligeramente con respecto a la posición del estator. Al desplazamiento entre los polos del rotor y del estator se le designa como el ángulo δ (grados eléctricos) y se le conoce como el ángulo de par.

En condiciones de vacío el motor demanda una potencia por fase que es suficiente para hacer operar al motor a la velocidad de sincronismo y cuyo valor es:

$$P_\phi = V_\phi I_a \cos \theta$$

Cuándo al motor se le aplica carga en su eje reduce su velocidad momentáneamente, al ajustar por si mismo en forma momentánea el cambio a las condiciones de carga, de esta manera el rotor cae un poco más atrás con respecto a la posición relativa del estator. Es decir, el ángulo de par aumenta al aumentar la carga, el voltaje resultante a través del circuito de armadura, y en consecuencia la corriente que se demanda de la fuente de alimentación aumenta, es decir, que el motor síncrono está en posición de aumentar su carga mecánica cambiando su posición relativa entre los ejes del rotor y estator, sin reducir su velocidad.

Cuándo la carga mecánica que se aplica a la flecha o eje del rotor en el motor síncrono es muy grande, el rotor puede tener una pérdida transitoria de sincronismo, después de la cual regresa a sus condiciones de estado permanente.

Al valor máximo del par que un motor puede desarrollar sin pérdida de sincronismo se le llama el par de arrastre y su valor puede variar entre el 125% y el 350% del par a plena carga.

La potencia bajo cualquier estado de carga es:

$$P_\phi = V_\phi I_a \cos \theta \text{ ; potencia por fase}$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \text{ ; potencia trifásica}$$

4.6 CURVA CARACTERÍSTICA PAR—VELOCIDAD

Los motores síncronos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante. Al estar conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, los sistemas de potencia aparecen como barrajes infinitos frente a los motores. Esto significa que el voltaje en terminales y la frecuencia del sistema serán constantes, independientemente de la cantidad de potencia tomada por el motor. La velocidad de rotación del motor está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, de modo que la velocidad del motor será constante, independientemente de la carga; como lo muestra la **Figura 39**.

Figura 39. Curva Característica Par vs Velocidad



La velocidad de estado estacionario del motor es constante desde vacío hasta el par máximo que puede suministrar el motor, tal que la regulación de velocidad de este motor es 0%. La ecuación del par es:

$$T_{ind} = (3 V_{\phi} E_g \text{ Sen } \delta) / (\omega_m X_s)$$

El par máximo cuando $\delta = 90 \text{ grados}$. Sin embargo, los pares normales de plena carga son muchos menores que aquellos. En efecto, el par máximo puede triplicar el par de plena carga de la máquina.

Cuando el par aplicado en el eje de un motor síncrono excede el par máximo, el rotor no puede permanecer más enlazado a los campos magnéticos estático y neto. En cambio, el rotor comienza a disminuir la velocidad frente a ellos. Como el rotor disminuye la velocidad, el campo magnético estático se entrecruza con el repetidamente, y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada paso. El enorme par resultante oscila primero en una forma y luego en otra causando que el motor entero vibre con fuerza. La pérdida de sincronización después que se ha excedido el par máximo, se conoce como deslizamiento de polos. El par máximo del motor está dado por:

$$T_{out} = (3 V_{\phi} E_g) / (\omega_m X_s)$$

Esta ecuación indica que cuanto mayor sea la corriente de campo (y por tanto E_g), mayor será el máximo par del motor. Por tanto, hay una ventaja en la estabilidad, si se opera el motor con una gran corriente de campo o un gran E_g .

4.7. CURVAS EN V

Durante la operación en estado permanente de las máquinas síncronas, existen características de operación relevantes que presenta la interacción entre el voltaje terminal, la corriente de campo, la corriente de armadura, el factor de potencia y la eficiencia.

Este tipo de características se puede representar por medio de curvas que tienen aplicación práctica en el caso particular de los motores síncronos; estas curvas se denominan **curvas V**.

El principio de elaboración de las **curvas V** parte de la consideración de que, cuando se varía la excitación de un motor síncrono trifásico que demanda potencia constante de una fuente de alimentación con voltaje constante, el factor de potencia del motor cambia. Es decir, el factor de potencia al que opera un motor síncrono y de aquí, su corriente de armadura, se puede controlar ajustando su corriente de excitación.

La curva que muestra la relación entre la corriente de armadura y la corriente de campo a voltaje terminal constante, con potencia constante en el eje, se conoce como **curva V** debido a su forma.

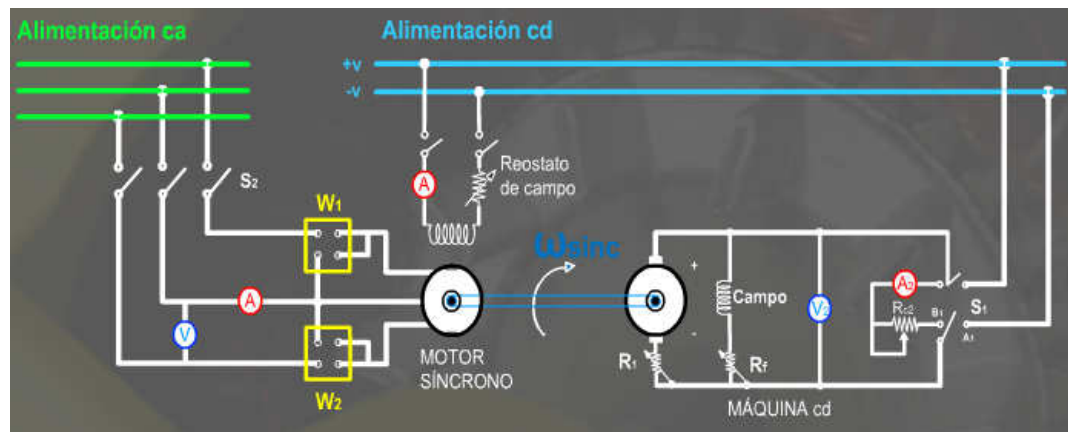
La potencia que demanda un motor síncrono está dada por:

$$P = \sqrt{3} V_L I_a \cos \theta$$

Dado que la potencia es constante y el voltaje de suministro también lo es, una reducción en el factor de potencia origina un incremento en la corriente de armadura o viceversa. Las curvas V para un motor síncrono dan la relación entre la corriente de armadura y la corriente de campo para diferentes potencias de entrada.

La determinación de las curvas V se hacen en forma experimental y para los propósitos didácticos se puede usar un circuito elemental de conexiones como el mostrado en la **Figura 40**.

Figura 40. Esquema Curvas en V



El motor síncrono se arranca con la ayuda de la máquina cd conectado como motor, con S_1 en la posición A_1 en derivación hasta llevarlo a su velocidad nominal; las resistencias R_1 y R_f se emplean respectivamente para el propósito de arrancar y controlar la corriente de campo de la máquina de corriente directa. Durante el arranque la resistencia del control de campo R_f se hace cero.

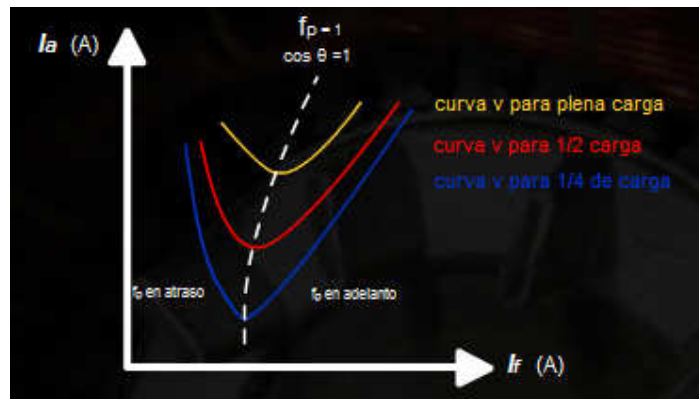
Cuando el motor síncrono está próximo a la velocidad de sincronismo su devanado de campo se energiza y el voltaje de la máquina alcanza el valor de la barra de alimentación en corriente alterna. De esta forma queda sincronizado y se interrumpe la alimentación de corriente directa abriendo el interruptor S_1 . en estas condiciones el motor se encuentra operando en vacío y puede accionar la máquina de corriente directa operando esta como generador. La máquina de corriente directa se hace trabajar como generador en derivación (shunt) haciendo la resistencia R_1 en el circuito de armadura cero, y quedando en la posibilidad de entregar carga al reostato R_{c2} .

Cuando el motor se encuentra operando en vacío se toman lecturas del amperímetro, voltímetro y vatímetros (W_1 y W_2) en el lado de corriente alterna para diferentes valores de corriente de excitación. La excitación se varía con la ayuda de un reóstato que se instala en el circuito de campo del motor síncrono.

A continuación se carga el generador de corriente directa pasando S_1 a la posición B_1 de manera que el motor síncrono se cargue aproximadamente a $\frac{1}{4}$ de plena carga. Manteniendo la carga constante, se toman lecturas nuevamente en el amperímetro, voltímetro y vatímetros en el lado de corriente alterna para diferentes valores de excitación. Este proceso se debe repetir para el 50% de carga y para plena carga en el motor síncrono.

Las **curvas V** para $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y plena carga se muestran en la **Figura 41**.

Figura 41. Curvas Características en V



En las **curvas V** con diferentes valores de potencia de entrada, se puede observar que a bajos valores de corriente de campo, la corriente de armadura es grande con respecto al voltaje. En la medida que la corriente de campo se aumenta, el factor de potencia en atraso mejora y la corriente de armadura se reduce hasta alcanzar su valor mínimo. Cuando la corriente de armadura alcanza su valor mínimo, el factor de potencia es unitario y la corriente de campo correspondiente se conoce como corriente de campo normal o excitación del motor para esa carga **E_g** particular.

El factor de potencia para cualquier valor de corriente de armadura **I_{a1}** se puede calcular con el auxilio de las curvas V:

$$\cos \theta = I_{mín} / I_{a1}$$

I_{min} es la mínima corriente que demanda el motor a una carga dada.

4.8 ARRANQUE DE LOS MOTORES SÍNCRONOS:

Los motores síncronos no tienen par de arranque propio, por lo que cada motor se debe llevar primero a la velocidad de sincronismo por algún medio externo antes de ser cargado. De hecho existen tres métodos básicos para el arranque seguro de un motor síncrono:

- Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda acelerar y se enlace con él durante medio ciclo de rotación del campo magnético. Esto se puede llevar a cabo reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.
- Utilizar un motor primario externo para acelerar el motor síncrono hasta la velocidad de sincronismo, pasar por el proceso de entrada de sincronismo y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagando o desconectando el motor primario, la máquina síncrona se convertirá en un motor.
- Utilizando devanados de amortiguación.

4.8.1 Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica. Si el campo magnético de un rotor síncrono rota a una velocidad suficientemente baja, no habrá dificultad para que el rotor acelere y se enlace con el campo magnético del estator. La velocidad de los campos magnéticos estáticos se puede aumentar hasta la velocidad de operación, incrementando gradualmente la frecuencia eléctrica hasta alcanzar su valor normal de 50 o 60 Hz.

Este método de arranque de los motores síncronos tiene un gran sentido pero también tiene un problema grave ¿de dónde se obtiene la frecuencia eléctrica variable?

Los sistemas normales de potencia se regulan cuidadosamente a 50 o 60 Hz por lo que, hasta hace poco, cualquier fuente de voltaje de frecuencia eléctrica variable debería provenir de un generador específico. Tal situación no era práctica, excepto en algunas circunstancias opcionales. Hoy día las cosas son diferentes. Los rectificadores inversores y los cicloconvertidores, que pueden utilizarse para convertir una entrada de frecuencia constante a cualquier frecuencia de salida deseada. El desarrollo de tal accionamiento de estado sólido y frecuencia variable moderna, posibilita el control continuo de la frecuencia eléctrica aplicada al motor en todo el rango desde una fracción de Hertz hasta la frecuencia nominal más elevada. Si tal unidad controladora de frecuencia variable se incluye en un circuito motor—control para controlar la velocidad, entonces es muy fácil poner en marcha los motores síncronos: simplemente se ajusta la frecuencia a un valor muy bajo para el arranque y luego se eleva hasta la frecuencia de operación deseada por el funcionamiento normal.

Cuando se opera un motor síncrono a una velocidad más baja que la nominal, su voltaje interno generado E_g será menor que el normal. Si E_g se reduce en magnitud, debe reducirse el voltaje aplicado a los terminales del motor para mantener la corriente del estator en niveles seguros. En todo controlador de frecuencia variable o circuito

arrancador de frecuencia variable, el voltaje debe variar casi linealmente con la frecuencia aplicada.

4.8.2 Arranque del Motor mediante un Motor Primario Externo Consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces, la máquina síncrona se puede conectar en paralelo con su sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina. Desconectado el motor de arranque, el eje de la máquina se desacelera, el campo magnético del rotor queda atrás del campo neto y la máquina síncrona comienza a actuar como motor. Una vez completado el proceso de sincronización, el motor síncrono se puede cargar de manera normal.

Este proceso completo no es tan absurdo como parece pues muchos motores síncronos forman parte de conjuntos motor—generador y, en estos conjuntos, la otra máquina puede servir como motor de arranque de la máquina síncrona. Además, el motor de arranque sólo necesita vencer la inercia de la máquina síncrona en vacío, sin carga impuesta hasta que el motor se sincronice con el sistema de potencia. Puesto que únicamente debe ser vencida la inercia del motor, el motor de arranque puede tener una capacidad mucho menor que la del motor síncrono que arranca.

Dado que la mayoría de los motores síncronos tienen sistemas de excitación sin escobillas montados en sus ejes, con frecuencia es posible utilizar esos excitadores como motores de arranque.

Para muchos motores síncronos de mediana y gran potencia, la única solución posible puede ser un motor externo de arranque o arrancador que utiliza el excitador ya que los sistemas de potencia a los que están unidos no están en capacidad de soportar las corrientes de arranque requeridas al utilizar la técnica de los devanados de amortiguación. El esquema utilizado para este método de arranque del motor síncrono es el mostrado en la **Figura 42**.

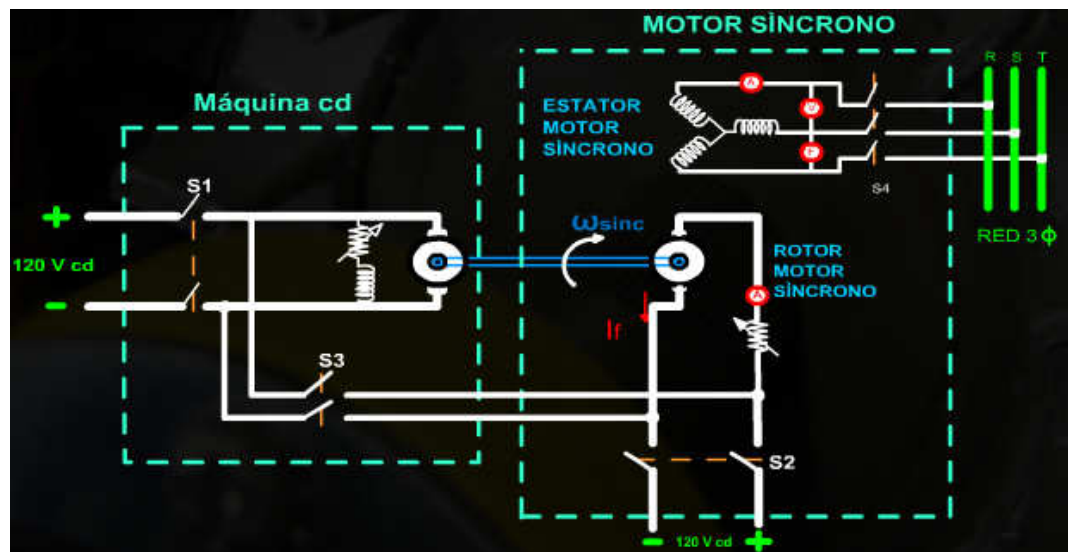
4.8.3 Arranque de Motores utilizando Devanados de Amortiguación Es la técnica mas popular para el arranque de motores síncronos es emplear devanados de amortiguación o devanados amortiguadores. Estos devanados son barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor del motor síncrono y cortocircuitadas en cada extremo por un gran anillo de cortocircuitado.

Si se adicionan devanados de amortiguación a una máquina síncrona para el arranque, se obtiene una ventaja gratuita: aumento en la estabilidad de la máquina. El campo magnético del estator rota a velocidad constante, que cambia solo cuando varía la frecuencia del sistema. Si el rotor gira a velocidad constante, los devanados de amortiguación no tienen voltaje inducido alguno. Si el rotor gira mas lento que la velocidad síncrona, habrá movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, y se inducirá un voltaje en los devanados. Este voltaje produce un flujo de corriente que a su vez, produce un campo magnético. La interacción de los dos campos magnéticos produce un par que tiende a acelerar la máquina de nuevo. Si el rotor gira mas rápidamente que el campo magnético del estator, se producirá un par que intenta frenar al rotor. En consecuencia, el par producido por los devanados de amortiguación acelera las máquinas lentas y desacelera las rápidas.

Si una máquina tiene devanados de amortiguación, se puede arrancar mediante el siguiente procedimiento:

1. desconecte los devanados de campo de su fuente de potencia DC y cortocircuitélos.
2. aplique un voltaje trifásico al estator del motor y deje acelerar el rotor hasta cerca de la velocidad síncrona. El motor no deberá tener carga en su eje para que su velocidad llegue a ser lo más cercana posible a la velocidad síncrona.
3. conecte el circuito DC de campo a la fuente de potencia. Luego, el motor se pondrá a paso a la velocidad síncrona y las cargas podrán ser acopladas a su eje.

Figura 42. Esquema Arranque motor Síncrono



4.9 CONDENSADORES SÍNCRONOS

Una de las ventajas adicionales del uso de los motores síncronos en instalaciones eléctricas de potencia, es el hecho de que pueden operar con factor de potencia en atraso, unitario o en adelanto; siendo de especial interés el último caso. Esta característica de operación hace que cuando opere con otras cargas inductivas, como por ejemplo motores de inducción, que operan a factor de potencia atrasado, la potencia reactiva suministrada por el motor síncrono a factor de potencia adelantado, compensa a la potencia reactiva a factor de potencia atrasado proporcionada por otros motores, mejorando de esta manera el factor de potencia global de la instalación.

La corrección del factor de potencia se logra haciendo operar el motor síncrono en vacío y en forma sobreexcitada de manera que la corriente se adelante del voltaje 90° . De esta manera se dice que el motor “flota” sobre la línea de alimentación al no tener carga mecánica y entonces opera como si se tratará de un capacitor estático y de aquí viene el nombre de condensador síncrono o también capacitor síncrono.

El condensador síncrono usado específicamente para tal fin, tiene diferencias con respecto al motor síncrono (usado como tal), requiere de más cobre en el devanado de campo para poder conducir el incremento en la corriente de campo. Por otra parte las chumaceras y el eje pueden ser menos robustos al no requerir de par para la carga.

4.10 APLICACIÓN DE LOS MOTORES SÍNCRONOS

Los motores síncronos para aplicaciones industriales y en sistemas de potencia se pueden encontrar:

- 1- En las centrales eléctricas y en las subestaciones conectado en paralelo con el barraje del sistema de potencia.
- 2- En las industrias que tienen un elevado número de motores de inducción, es posible usarlas como una de las alternativas para mejorar el factor de potencia.
- 3- Al final de algunas líneas de transmisión para controlar el voltaje mediante el procedimiento de variar su excitación.
- 4- Como elemento de accionamiento de grandes cargas como por ejemplo molinos de cemento, molinos textiles, molinos de hule y en la industria minera entre otros.

Este tipo de motores se usan principalmente para operar en forma continua con equipo que requiere velocidad constante, tal como bombas centrífugas, ventiladores centrífugos, compresores de aire y amoníaco, grupos motor—generador, etc.

4.10.1 Ventajas de los motores síncronos

- 1- el factor de potencia se puede variar como sea requerido.
- 2- Puede dar velocidad constante de condiciones de vacío a condiciones de plena carga.
- 3- La potencia varía linealmente con el voltaje.

4.10.2. Desventajas de los motores síncronos

- 1- no puede ser usado para aplicaciones en donde se requiere velocidad variable ya que no tiene posibilidad de variar su velocidad, a no ser que tengan un variador de frecuencia.
- 2- Requiere de una excitación I_d que se debe proveer en algunos casos de una fuente externa.
- 3- No puede arrancar bajo carga ya que su par de arranque es cero.
- 4- Puede salir de sincronismo y parar cuando se sobrecarga.
- 5- Requiere de anillos colectores y de escobillas.

4.11 RESUMEN ECUACIONES UTILIZADAS EN MOTORES SÍNCRONOS

$$\omega_{sinc} \text{ (rev/min)} = 120 f_e / P$$

; ω_{sinc} : Velocidad síncrona

; f_e : frecuencia eléctrica

; P: Número de polos

$$X_s = X + X_a$$

; X_s : Reactancia síncrona

$$P_{int} = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta$$

; P_{int} : Potencia de entrada

$$P_{m\acute{a}x} = (3 V_\phi E_g) / X_s$$

; $P_{m\acute{a}x}$: Potencia máxima producida

$$P = (3 V_\phi E_g \text{ Sen}\delta) / X_s$$

; P: Potencia producida

$$E_g = V_\phi - jX_s I_a - R_a I_a$$

; E_g : Voltaje generado

$$T_{ind} = (3 V_\phi E_g \text{ Sen}\delta) / (\omega_m X_s)$$

; T_{ind} : Torque inducido

; ω_m : Velocidad mecánica, en rad/s

$$T_{m\acute{a}x} = (3 V_\phi E_g) / (\omega_m X_s)$$

; $T_{m\acute{a}x}$: Torque máximo

5.GENERADORES EN PARALELO

5.1 INTRODUCCIÓN

En el mundo actual es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre energía eléctrica exclusivamente a su propia carga. Esta situación solo se encuentra en algunas aplicaciones que se salen de lo normal, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay mas de un generador que opera en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas.

Un sistema eléctrico, generalmente consta de varias centrales generadoras, funcionando todas ellas en paralelo. En cada una de las centrales puede haber varios alternadores de corriente alterna y/o generadores de corriente continua funcionando en paralelo. Existen numerosas ventajas en la subdivisión de un sistema de generación en varias centrales más pequeñas, tanto desde el punto de vista económico como estratégico. Estas ventajas se aplican también al uso de varios generadores mas pequeños en lugar de una única máquina grande, aunque esta última tiene mejor rendimiento cuando funciona a su carga nominal. Las principales ventajas del sistema en paralelo con respecto a un solo generador son:

1. Si solo hay un grupo generador suministrando potencia y queda por fuera del sistema por cualquier razón, se perdería toda la potencia de la central; mientras que si se necesita reparar una de varias unidades más pequeñas, todavía quedan disponibles las demás unidades generadoras para prestar el servicio según las necesidades.
2. Una sola unidad grande, para conseguir máximo rendimiento, debe funcionar a su carga nominal, pero desde el punto de vista económico hacer funcionar una unidad grande con cargas pequeñas no es viable. En cambio con varias unidades pequeñas funcionando en paralelo puede seguirse la demanda según sea su fluctuación , de modo que cada máquina puede hacerse funcionar lo más cerca de su capacidad nominal, proporcionando así máximo rendimiento de la central y del sistema.
3. Al aumentar la demanda media del sistema y de la central, pueden instalasen nuevos grupos. La inversión es inicialmente menor y su crecimiento sigue al de la demanda.
4. Existe un límite físico y económico a la posible capacidad de un solo generador.

5.2 CONDICIONES REQUERIDAS PARA OPERAR EN PARALELO

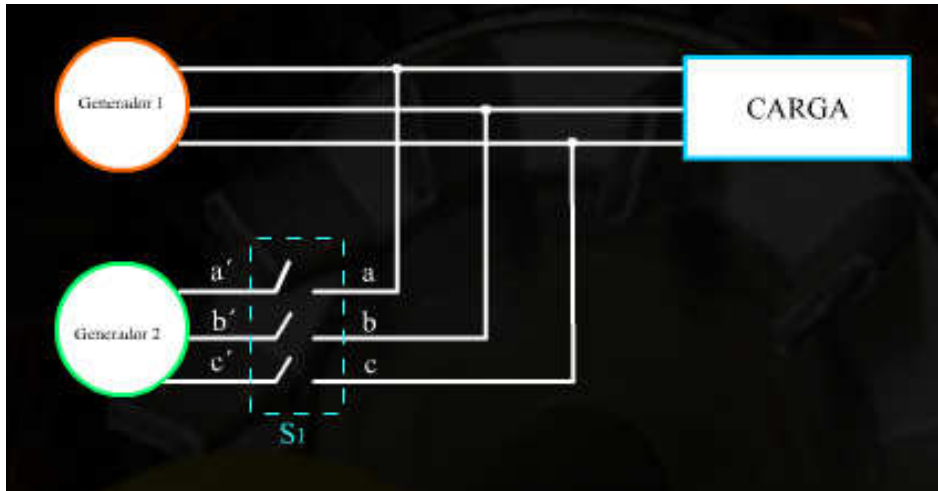
La **Figura 43** muestra un generador síncrono G_1 suministrando potencia a una carga con otro generador G_2 a punto de conectarse en paralelo con G_1 por medio del cierre del interruptor S_1 .

¿Qué condiciones se deben cumplir antes de poder cerrar el interruptor y de conectar los dos generadores?

Si el interruptor se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente. Si los voltajes no son exactamente iguales en cada uno de los generadores que se conectarán juntos, habrá un flujo de corriente muy grande cuándo se cierre el interruptor. Para evitar este problema, cada una de las 3 fases debe tener exactamente la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase en el conductor al que se conectará. En otras palabras, el voltaje en la fase **a** debe ser exactamente igual al voltaje en la fase **a'** y así en forma sucesiva para las fases **b -b'** y **c-c'**. Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones de puesta en paralelo:

1. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
2. Deben ser iguales los voltajes de línea rms de los dos generadores, tanto en magnitud como en fase.
3. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación, debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación.

Figura 43. Generadores en Paralelo

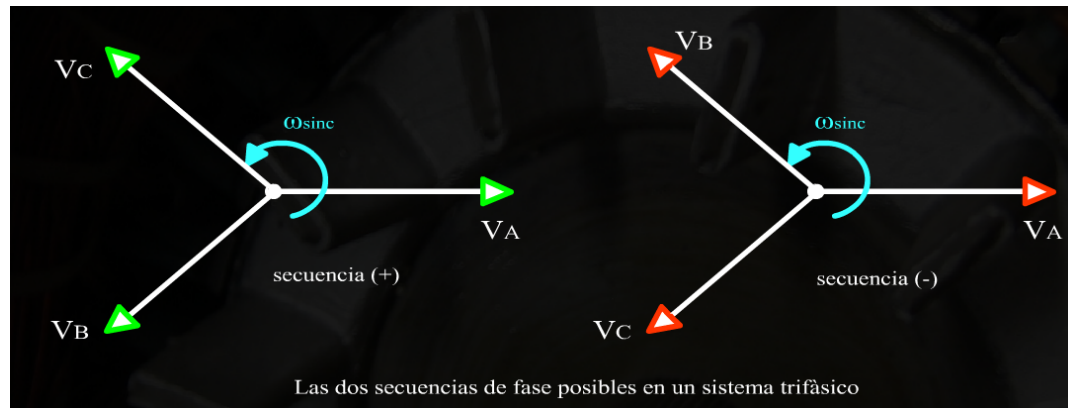


Estas condiciones de puesta en paralelo requieren ciertas explicaciones. La condición 1 es obvia; para que dos grupos de voltajes sean idénticos, deben tener la misma secuencia.

Los voltajes en las fases **a** y **a'** serán completamente idénticos en todo momento si ambas magnitudes y sus ángulos son iguales, lo que explica la condición 2.

Para la condición 3 si las frecuencias de los generadores no son muy parecidas cuando se conectan juntos, se presentarán grandes potencias transitorias hasta que se estabilicen los generadores en una frecuencia común.

Figura 44. Secuencia de Fase



5.3 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA CONECTAR GENERADORES EN PARALELO.

Supóngase que se va a conectar el generador G_2 al sistema en operación que se muestra en la **Figura 45**.

Se deben seguir los siguientes pasos para conectarlos en paralelo.

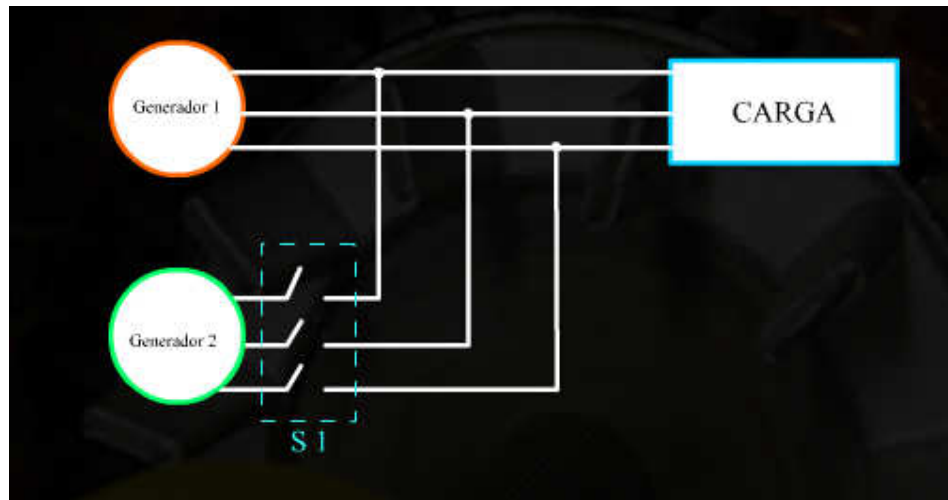
1. Utilizando voltímetros se deben ajustar la corriente de campo del generador en aproximación hasta que su voltaje en los terminales sea igual al voltaje en línea del sistema en operación.
2. La secuencia de fase del generador en aproximación se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación.

La secuencia de fase se puede revisar de varias maneras. Una de ellas es conectar alternativamente un pequeño motor de inducción a los terminales de cada uno de los dos generadores, si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones, entonces la secuencia de fase es la misma en ambos generadores. Si el motor gira en direcciones opuestas, entonces las secuencias de fase son diferentes y se deben invertir dos de los conductores del generador en aproximación. Otra manera de revisar la secuencia de fase es el método de las 3 lámparas enunciados más adelante, o también por medio de un secuencímetro.

A continuación la frecuencia del generador en aproximación se ajusta para que sea un poco mas alta que la frecuencia del sistema en operación. Esto se lleva a cabo primero observando un medidor de frecuencia hasta que las frecuencias sean similares y entonces se observan los cambios de fase entre los sistemas. Se ajusta el generador en aproximación a una frecuencia un poco mas alta para que cuando se conecte se incorpore a la línea suministrando potencia como generador, en lugar de consumirla como lo hace un motor.

¿Como se puede saber cuándo los dos sistemas están por fin en fase?

Figura 45. Generadores en Paralelo



Para ello se utilizan métodos tales como “el método de las lámparas apagadas”, “el método de las lámparas apagadas” y “el método de las dos lámparas encendidas y una apagada” que se explicarán más adelante.

Otro método es la utilización de un sincronoscopio. En la **Figura 46** se puede ver la parte frontal de un sincronoscopio.

Figura 46. Sincronoscopio



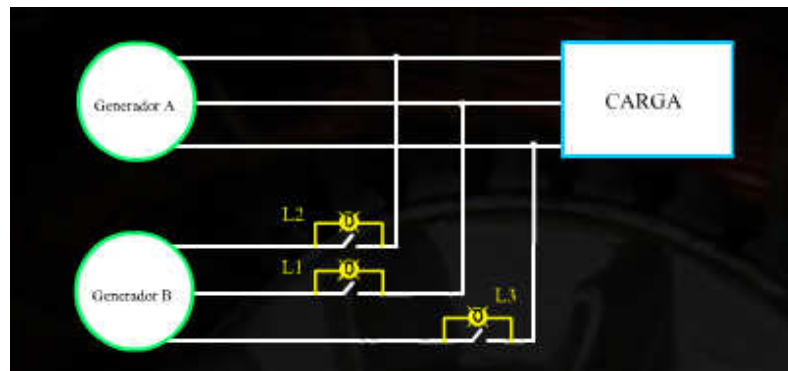
Este dispositivo muestra la diferencia de Angulo entre las dos fases analizadas; El (0) en el equipo significa que los sistemas están en fase. Ya que las frecuencias de los dos sistemas son un poco diferentes, el ángulo de fase en el medidor cambiará lentamente. Si el generador o sistema en aproximación es más rápido que el sistema en operación (situación deseada), entonces el ángulo de fase avanza y la aguja del sincronoscopio gira en el sentido de las manecillas del reloj. Si la máquina en aproximación es más lenta la aguja girará en sentido contrario a las manecillas del

reloj. Cuando la aguja del sincronoscopio está en una posición vertical, los voltajes están en fase y se puede cerrar el interruptor para conectar el sistema. Sin embargo nótese que un sincronoscopio verifica las relaciones en solo una fase; no brinda información sobre las restantes.

En los generadores más grandes que pertenecen a sistemas de potencia, todo el proceso de conectar un generador nuevo en paralelo está automatizado y la computadora lleva a cabo esta tarea. Sin embargo, en generadores más pequeños el operador ejecuta manualmente los pasos antes descritos de conexión en paralelo.

5.4 EL MÉTODO DE LAS TRES LÁMPARAS APAGADAS

Figura 47. Esquema Método de las tres Lámparas Apagadas



El esquema de conexión se muestra en la **Figura 47**.

Se requiere acoplar el generador *B* en paralelo con el sistema; aparecen conectadas tres lámparas a través de los terminales abiertos del interruptor que conecta el generador al sistema, de manera que estas brillan y se opacan juntas. Si brillan y se apagan en secuencia quiere decir que el generador no se encuentra conectado correctamente con las barras, y por lo tanto, se debe cambiar dos de los tres conductores del generador de su posición. Cuando el parpadeo de las lámparas se hace más lento, el interruptor de puesta en paralelo se cierra instantáneamente cuando las lámparas están apagadas.

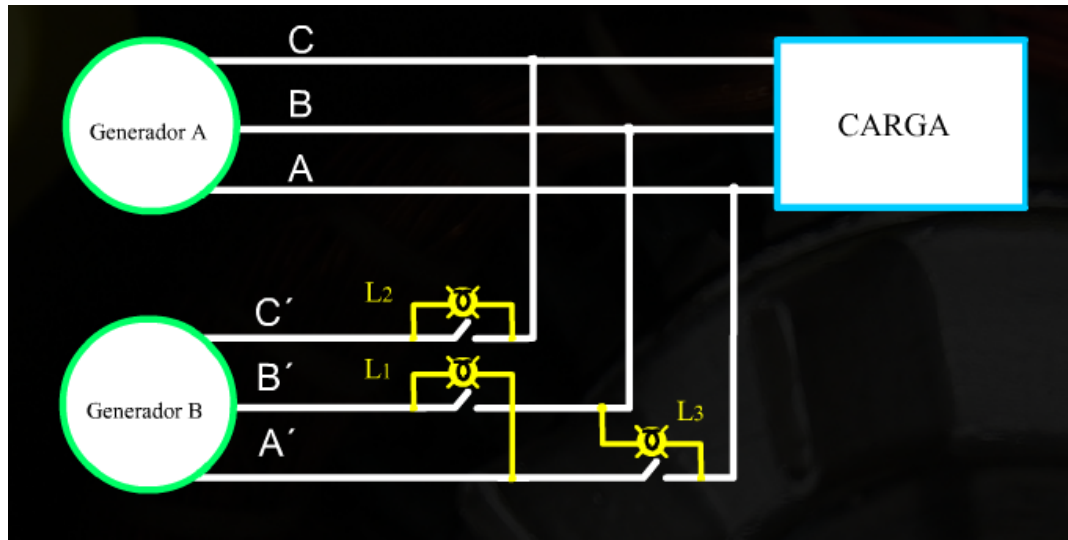
La desventaja de este método es que las lámparas pueden observarse apagadas aún cuando exista un voltaje considerable entre sus terminales y si los generadores se conectan en paralelo en esta condición puede ocurrir disturbios severos sobre todo en máquinas de gran potencia y alta velocidad. También tiene como desventaja este método que no se sabe si la máquina va a baja velocidad o va muy rápido.

Las desventajas del método anterior se pueden eliminar mediante el método llamado de las dos lámparas encendidas y una lámpara apagada.

5.5 EL METODO DE LAS DOS LÁMPARAS ENCENDIDAS Y UNA APAGADA

Se realiza la conexión de las lámparas como lo indica la **Figura 48**.

Figura 48. Esquema método de las dos lámparas encendidas y una apagada



Dado que cerca del punto de sincronismo la brillantez de las lámparas L_1 y L_3 se incrementa y L_2 se oscurece, la sincronización se puede lograr con cierta precisión, por lo que es más fácil determinar el momento de cerrar el interruptor.

Para ilustrar lo anterior considérese que la estrella **ABC** representa el voltaje de las barras y la estrella **A'B'C'** el voltaje del generador entrante (2). Ver **Figura 49**.

El voltaje instantáneo a través de las tres lámparas está dado por los vectores **AB'**, **A'B**, y **CC'**. Cuando la frecuencia del generador entrante es la misma que la de la barra a la cual se va acoplar, ambos diagramas giran a la misma velocidad y la diferencia de potencial entre cada lámpara pertenece constante.

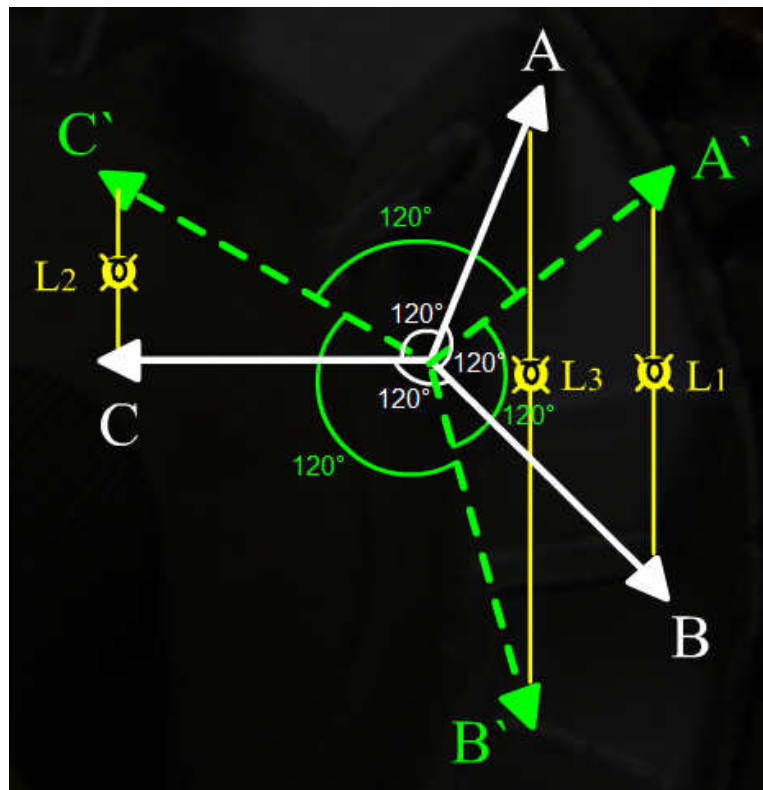
Si la máquina entrante va demasiado rápido entonces el diagrama **A'B'C'** girará más rápidamente que **ABC** de manera que el voltaje a través de la lámpara **L3** representado por **AB'** disminuye, el voltaje a través de la lámpara **L1** representado por **A'B** aumenta y el voltaje en la lámpara **L2** representada por **CC'** aumenta.

El interruptor, se cierra en el momento en que los cambios en la luz son muy lentos y la lámpara **L2** se encuentra apagada.

5.6 CARACTERÍSTICA DE FRECUENCIA—POTENCIA Y DE VOLTAJE—POTENCIA REACTIVA EN UN GENERADOR SÍNCRONO

Todos los generadores son accionados por un motor primario, que es la fuente de potencia mecánica del generador. Existen muchos tipos de motor primario entre los cuales se tiene: los motores de diesel, turbinas de gas, turbinas hidráulicas y las turbinas de viento, entre otras.

Figura 49. Diagrama en estrella



Sin importar la fuente original de potencia, todos los motores primarios tienden a comportarse de manera similar: conforme la potencia que se toma de ellos se incrementa, la velocidad a la que giran disminuye. Generalmente, este decremento en velocidad es no lineal, pero se incluye algún tipo de mecanismo regulador para que la disminución en la velocidad sea lineal con el incremento en la demanda de potencia.

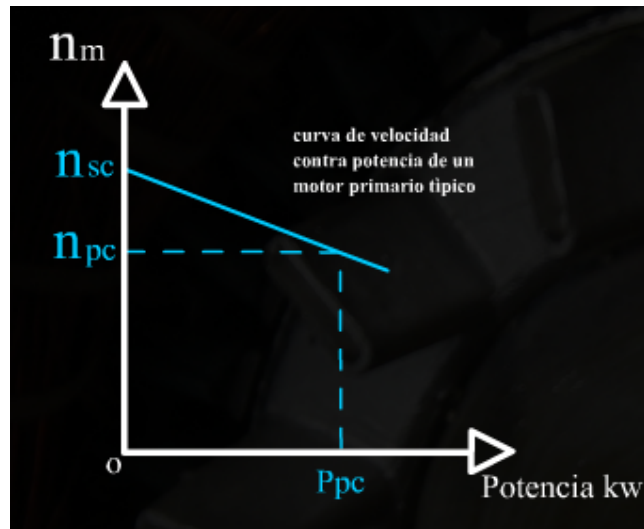
Cualquiera que sea el mecanismo regulador presente en el motor primario, siempre se ajusta para suministrar una característica de caída suave con el incremento de la carga. La siguiente ecuación define la caída de velocidad en un motor primario:

$$\%Reg \, n_m = ((n_{sc} - n_{pc}) / n_{pc}) * 100$$

Donde n_{sc} es la velocidad del motor primario en vacío y n_{pc} es la velocidad del motor primario a plena carga.

En la **Figura 50** se muestra una gráfica típica de velocidad y potencia.

Figura 50. Característica Velocidad vs Potencia

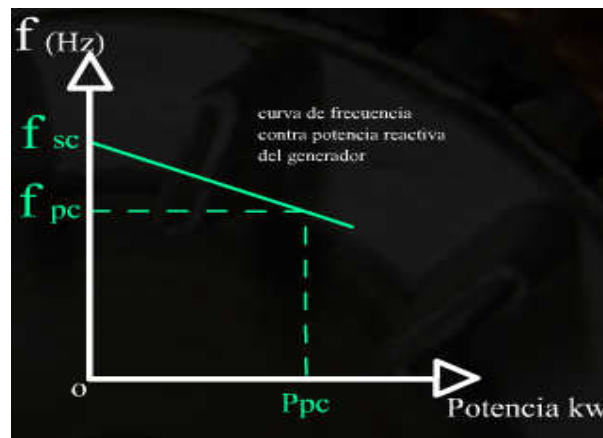


En una máquina síncrona la velocidad del eje está relacionado con la frecuencia eléctrica resultante por medio de la siguiente ecuación :

$$f_e = (n_m P) / 120$$

La potencia de salida de un generador síncrono está relacionada con su frecuencia. En la **Figura 51** se puede ver un ejemplo de una gráfica de frecuencia vs potencia. Las características de frecuencia—potencia de este tipo desempeñan un papel esencial en la operación en paralelo de los generadores síncronos.

Figura 51. Característica Frecuencia vs Potencia



La relación entre la potencia y la frecuencia se puede describir cuantitativamente por medio de la siguiente ecuación:

$$P = S_p (f_{sc} - f_{sis})$$

Dónde:

P : potencia de salida del generador

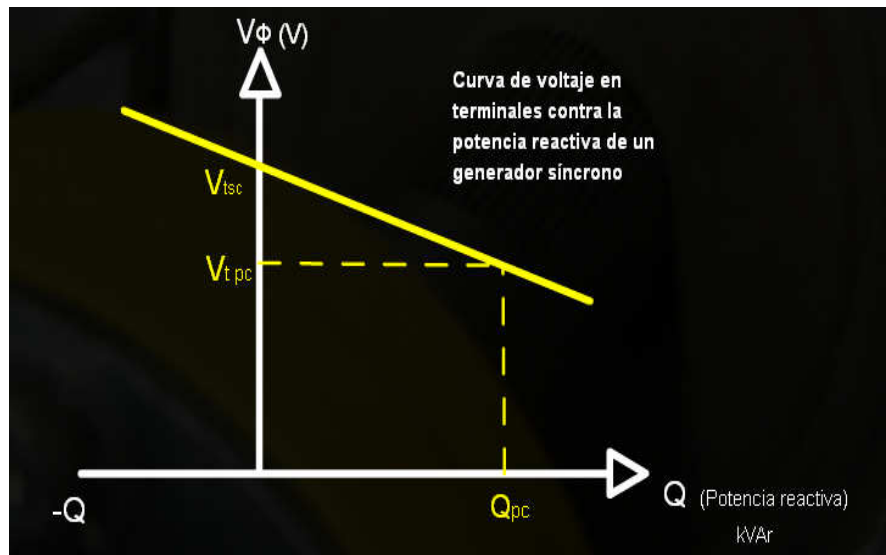
f_{sc} : frecuencia en vacío del generador

f_{sis} : frecuencia de operación del sistema

S_p : pendiente de la curva en kW / Hz o MW / Hz

Se puede deducir una relación similar para la potencia reactiva Q y el voltaje en los terminales V_ϕ . Cuando se añade una carga en retraso a un generador síncrono, su voltaje en terminales disminuye. De manera similar, cuando se añade una carga en adelante a un generador síncrono, se incrementa su voltaje en terminales. Es posible hacer una gráfica del voltaje en terminales y la potencia reactiva. Tal gráfica tiene una característica de caída como la que se observa en la **Figura 52**.

Figura 52. Característica Voltaje de fase vs Potencia Reactiva



Esta característica no es intrínsecamente lineal, pero muchos generadores de voltaje incluyen un dispositivo para que sea lineal. La curva característica se puede mover hacia arriba o hacia abajo por medio del cambio de punto de ajuste del voltaje de los terminales en vacío en el regulador de voltaje. Como con la característica de frecuencia—potencia, esta curva juega un papel importante en la operación de generadores síncronos en paralelo.

La relación entre el voltaje en los terminales y la potencia reactiva se puede expresar por medio de una ecuación similar a la relación de frecuencia—potencia si el regulador de voltaje produce una salida lineal con cambios en la potencia reactiva.

Es importante darse cuenta que cuando un generador opera solo, la potencia real P y la potencia reactiva Q suministradas por el generador será la cantidad demandada por la carga conectada al generador (las P y Q suministradas no pueden ser reguladas con los controles del generador). Por lo tanto, para cualquier potencia real, los puntos de ajuste del mecanismo regulador controlan la frecuencia de operación f_e del generador y para cualquier potencia reactiva, la corriente de campo controla el voltaje en los terminales V_ϕ del generador.

Para resumir, cuando un solo generador alimenta las cargas del sistema, entonces:

1. Las potencias real y reactiva suministradas por el generador serán la cantidad demandada por la carga conectada.
2. Los puntos de ajuste del mecanismo regulador controlan la frecuencia de operación del sistema de potencia.
3. La corriente de campo (o los puntos de ajuste del generador de campo) controlará el voltaje en los terminales del sistema de potencia.

5.7 OPERACIÓN DE GENERADORES EN PARALELO CON GRANDES SISTEMAS DE POTENCIA

Cuando un generador síncrono se conecta a un sistema de potencia, a menudo el sistema de potencia es tan grande que ninguna de las acciones del operador del generador tendrán gran efecto en el sistema de potencia. Este fenómeno se idealiza en el concepto de bus infinito. Un bus infinito es un sistema de potencia tan grande que su voltaje y frecuencia no cambian sin importar qué tanta potencia real y reactiva se le demande o se le suministre.

En la **Figura 53** se muestra la característica de potencia—frecuencia de un sistema como éste y en la **Figura 54** se puede ver su característica de potencia reactiva—voltaje.

Para entender el comportamiento de un generador que está conectado a un sistema tan grande, examínese un sistema que conste de un bus infinito y un generador en paralelo que esté suministrando potencia a una carga como lo muestra la **Figura 55**.

Supóngase que el motor primario del generador tiene un mecanismo regulador, pero el campo se controla manualmente por medio de un resistor.

Cuando se conecta un generador en paralelo con otro generador o con un sistema grande, la frecuencia y voltaje en los terminales de todas las máquinas deben ser iguales. Por lo tanto, sus características de frecuencia—potencia real y de potencia reactiva—voltaje se deben dibujar en una gráfica espalda con espalda, con un eje vertical en común. En la **Figura 56** se aprecia este tipo de gráfica que a menudo se llama diagrama de casa.

Figura 53. Característica Frecuencia vs Potencia

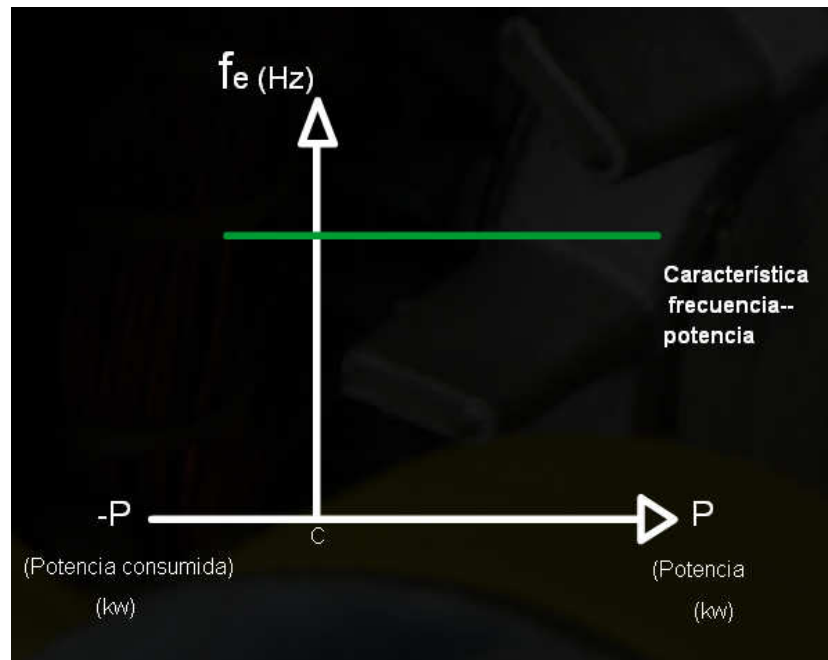


Figura 54. Curva Característica Voltaje vs Potencia

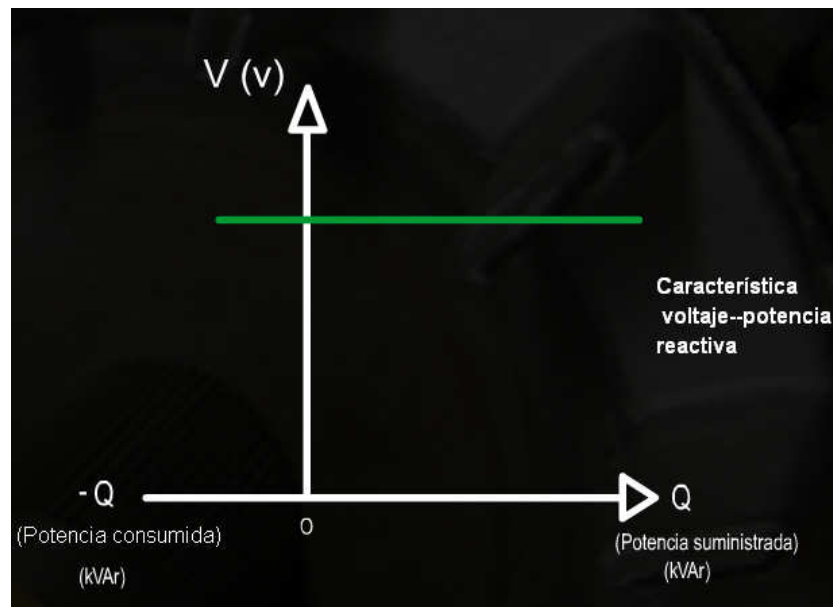


Figura 55. Generadores en Paralelo

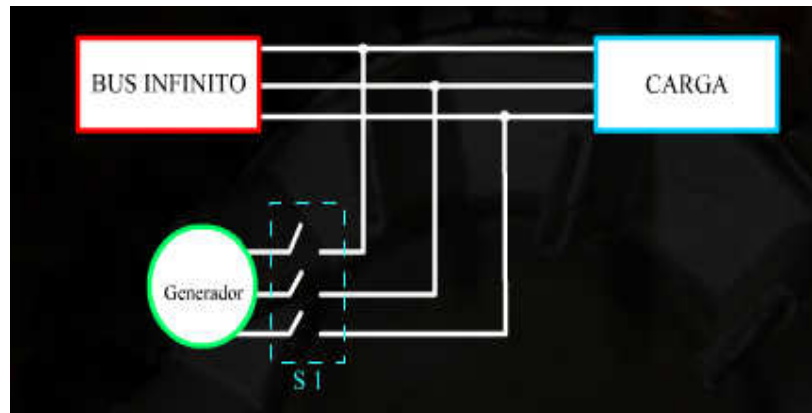
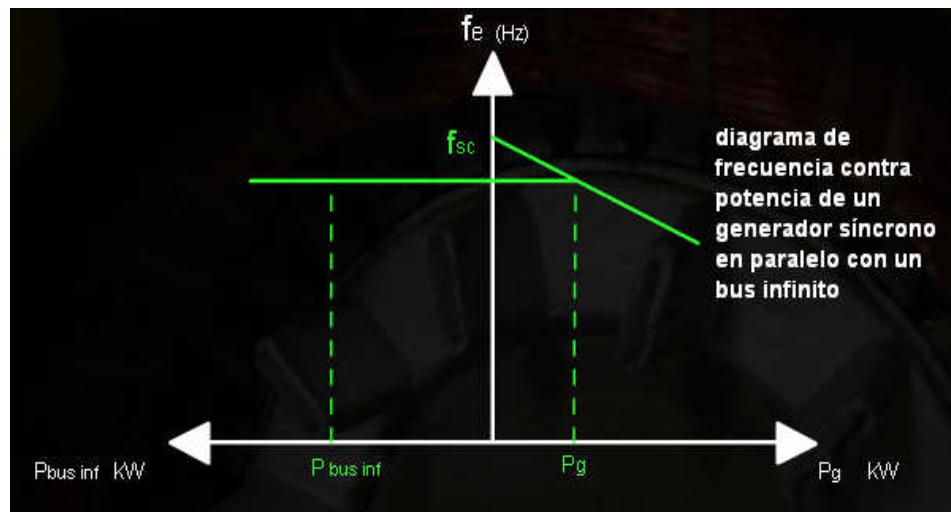


Figura 56. Diagrama de Casa



Supóngase que el generador acaba de ser conectado en paralelo con un bus infinito de acuerdo con el procedimiento dicho con anterioridad. Entonces el generador estará flotando en la línea, suministrando una pequeña cantidad de potencia real y muy poca o nada de la potencia reactiva. En la siguiente **Figura57** se puede observar esta situación.

Supóngase que el generador está en paralelo con la línea, pero en lugar de tener una frecuencia un poco más elevada que el sistema en operación, tiene una frecuencia un poco más baja. En este caso, cuando se completa la conexión en paralelo, la situación resultante se muestra en la **Figura58**.

Figura 57. Diagrama Frecuencia vs Potencia después de conexión en Paralelo

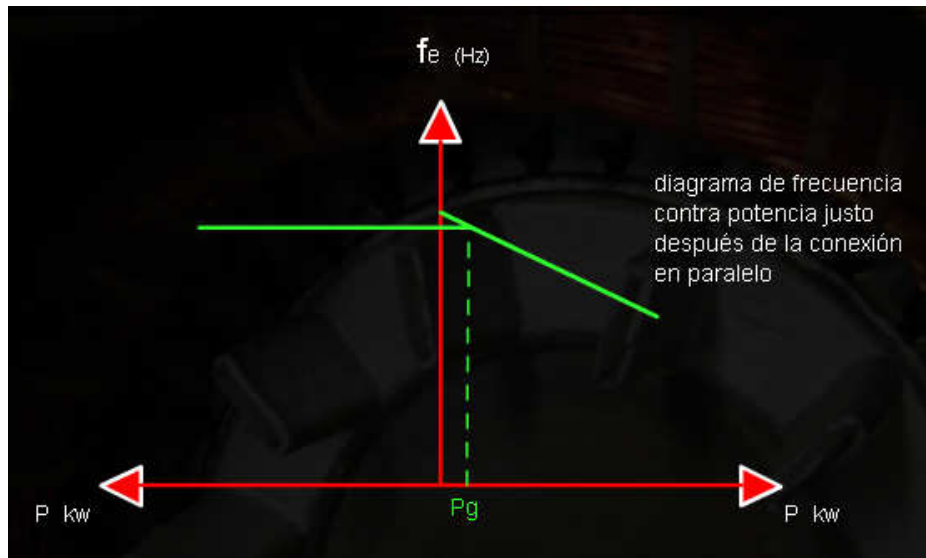
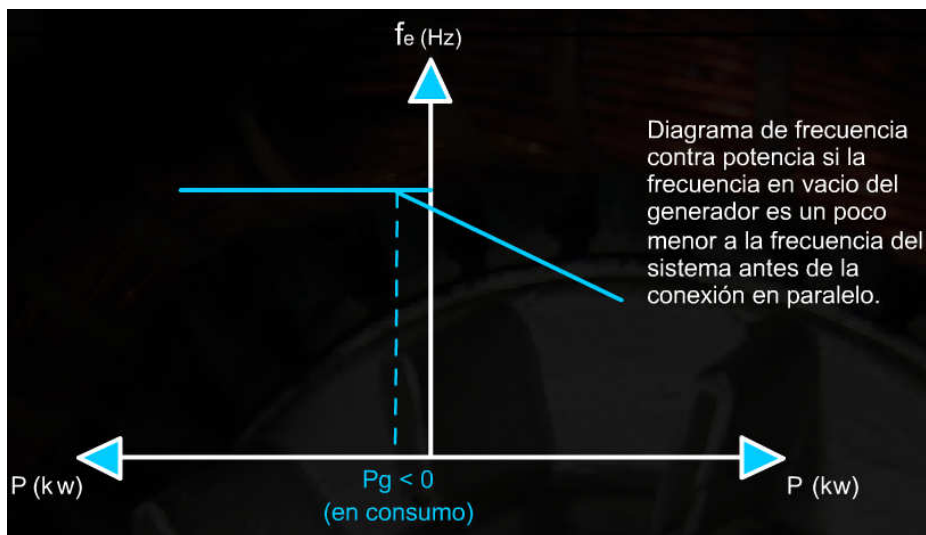


Figura 58. Diagrama Frecuencia vs Potencia

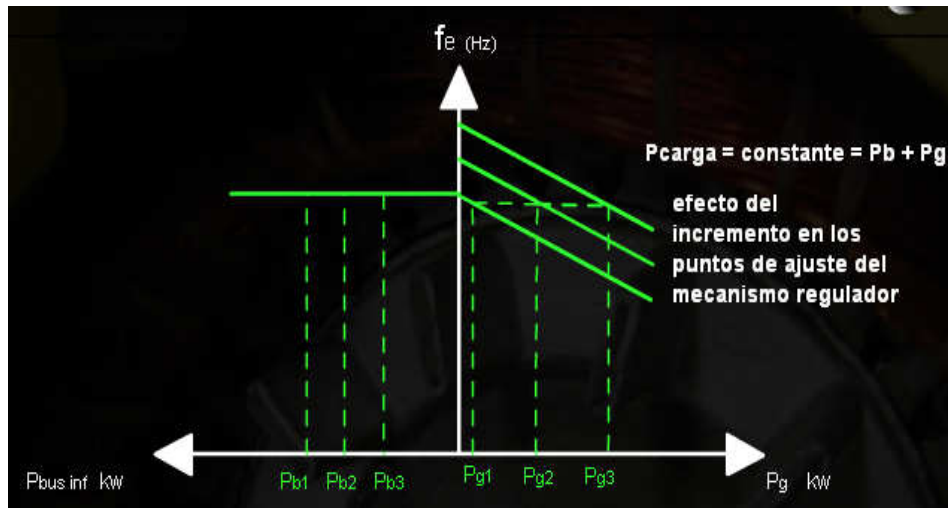


Nótese que aquí la frecuencia en vacío del generador es menor que la frecuencia de operación del sistema. A esta frecuencia, la potencia suministrada por el generador es en realidad negativa. En otras palabras, cuando la frecuencia en vacío del generador es menor que la frecuencia de operación del sistema, el generador en realidad consume potencia eléctrica y funciona como motor. Para asegurar que un generador que se conecta a la línea, suministre potencia en lugar de consumir potencia; se ajusta la frecuencia de la máquina en aproximación a un valor un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación. Muchos generadores reales tienen disparadores de potencia inversa conectados a ellos, por lo que es imperativo que se conecten en paralelo con una frecuencia mayor que la del sistema en operación. Si un generador

con estas características comienza a consumir potencia, se desconectará automáticamente de la línea.

Una vez que ya se conectó el generador, ¿qué pasará si se incrementan los puntos de ajuste del mecanismo regulador? El efecto de este incremento es un desplazamiento hacia arriba en la frecuencia en vacío del generador. Debido a que la frecuencia del sistema no cambia (la frecuencia de un bus infinito no puede cambiar), se incrementa la potencia suministrada por el generador. Esto se muestra en el diagrama de casa de la **Figura 59**.

Figura 59. Diagrama de casa



Conforme los puntos de ajuste del mecanismo regulador se incrementan aún más, la frecuencia en vacío se incrementa y también la potencia suministrada por el generador. Conforme la potencia de salida se incrementa, **E_g** mantiene una magnitud constante mientras que δ sigue incrementándose.

¿Qué sucede en este sistema si la potencia de salida del generador se incrementa hasta que excede la potencia que consume la carga? Si esto sucede, la potencia extra generada fluye de regreso al bus infinito. Un bus infinito, por definición, puede suministrar o consumir cualquier cantidad de potencia sin cambiar la frecuencia, por lo que consume la potencia extra.

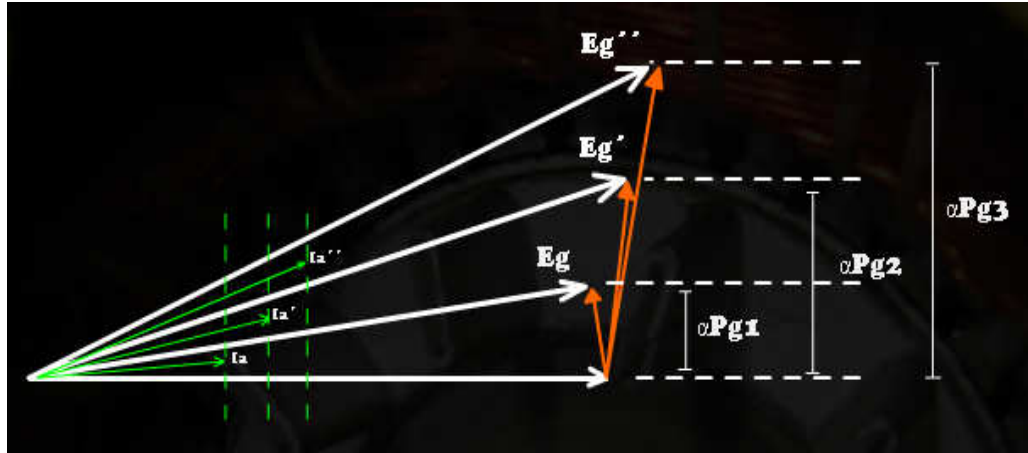
Después de ajustar la potencia real del generador en el nivel deseado, el diagrama fasorial del generador es como se muestra en la **Figura 60**.

De la **Figura 60** se nota que el generador en realidad opera con un factor de potencia levemente en adelanto y suministra potencia reactiva negativa. Alternativamente, se puede decir que el generador consume potencia reactiva. ¿Cómo se puede ajustar el generador para que suministre cierta potencia reactiva Q al sistema? Esto se puede lograr por medio del ajuste de la corriente de campo de la máquina. Para entender porque esta declaración es cierta, es necesario considerar las restricciones en la operación del generador en estas circunstancias. La primera restricción en el

generador es que la potencia debe permanecer constante cuando cambia I_f . La potencia que entra en un generador está dada por la ecuación:

$$P_{ent} = T_{ind} \omega_m$$

Figura 60. Diagrama Fasorial



Ahora, el motor primario de un generador síncrono tiene una característica de par—velocidad para cualquier punto de ajuste del mecanismo regulador. Esta curva solo cambia cuando varían los puntos de ajuste del mecanismo regulador. Debido a que el generador está unido a un bus infinito, su velocidad no puede cambiar. Si la velocidad del generador no cambia y los puntos de ajuste del mecanismo regulador no se cambian, la potencia suministrada por el generador debe permanecer constante.

El incremento en la corriente de campo en un generador síncrono que opera en paralelo con un bus infinito causa el incremento de la potencia reactiva de salida del generador.

Para resumir, cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito:

1. El sistema al que se conecta el generador controla la frecuencia y voltaje en los terminales del generador.
2. Los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador controlan la potencia real suministrada al sistema por el generador.
3. La corriente de campo en el generador controla la potencia reactiva suministrada al sistema por el generador.

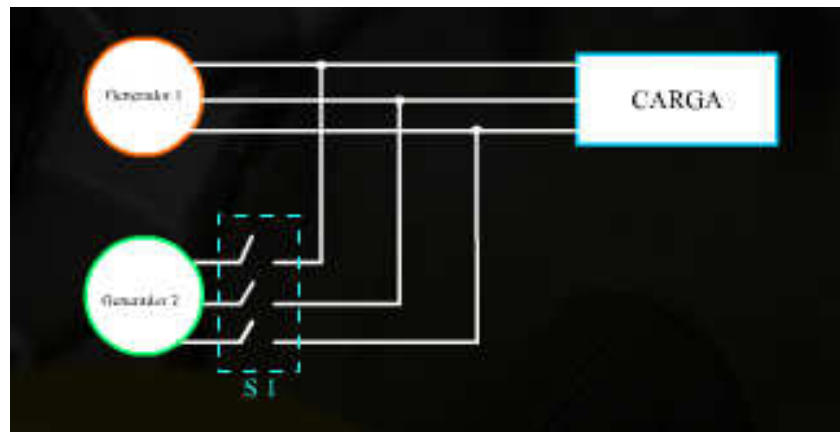
5.8 OPERACIÓN DE GENERADORES EN PARALELO CON OTROS GENERADORES DEL MISMO TAMAÑO

Cuando un generador opera solo, las potencias real y reactiva (P y Q) suministradas por el operador son fijas, están restringidas al valor de la potencia demandada por el sistema y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían

la frecuencia y el voltaje en los terminales. Cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito, el bus infinito restringe a la frecuencia y al voltaje en los terminales a ser constantes y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían las potencias real y reactiva. ¿Qué sucede cuándo un generador síncrono se conecta en paralelo no con un bus infinito, sino con otro generador del mismo tamaño? ¿Cuál será el efecto de cambiar los puntos de ajuste del mecanismo regulador y las corrientes de campo?

En la **Figura 61** se puede ver el sistema resultante si se conecta un generador con otro del mismo tamaño.

Figura 61. Generadores en Paralelo



En este sistema la restricción básica es que la suma de las potencias real y reactiva suministradas por los dos generadores, deben ser iguales a las P y Q que demanda el sistema. La frecuencia del sistema no está restringida a ser constante, ni tampoco la potencia de un generador lo está. En la **Figura 62** se muestra el diagrama de potencia—frecuencia de un sistema de este tipo inmediatamente después que $G2$ se conecta en paralelo con la línea.

En este caso la potencia total (que es igual a la potencia de la carga) está dada por:

$$P_{tot} = P_{carga} = P_{G1} + P_{G2}$$

y la potencia reactiva total está dada por:

$$Q_{tot} = Q_{carga} = Q_{G1} + Q_{G2}$$

¿Qué sucede si se incrementan los puntos de ajuste del mecanismo regulador de $G2$? La curva de potencia—frecuencia de $G2$ se desplaza hacia arriba como se muestra en la **Figura 63**.

Figura 62. Diagrama Frecuencia vs Potencia

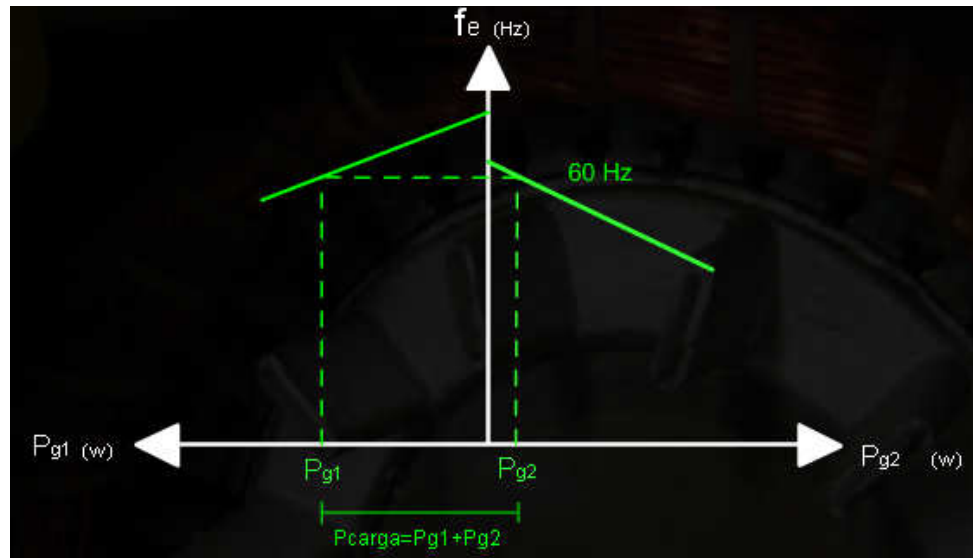
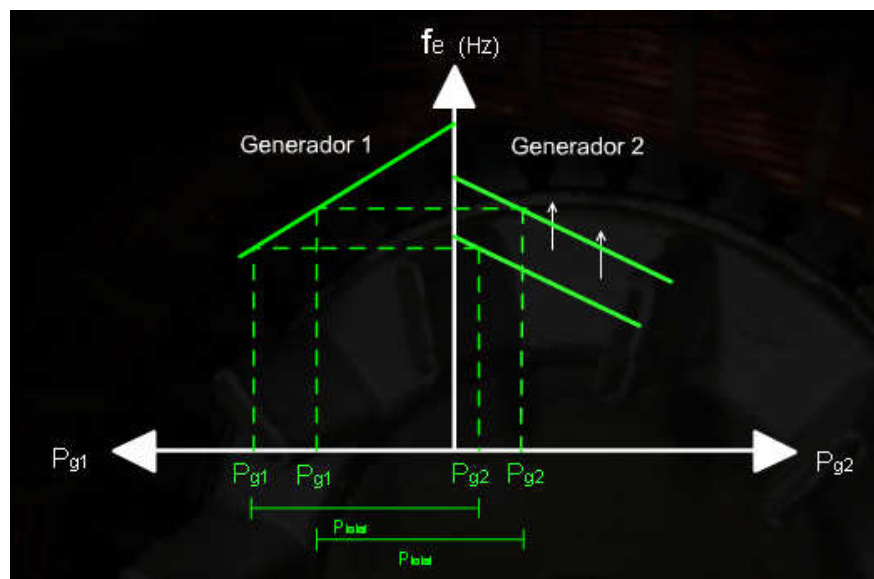


Figura 63. Diagrama Frecuencia vs Potencia



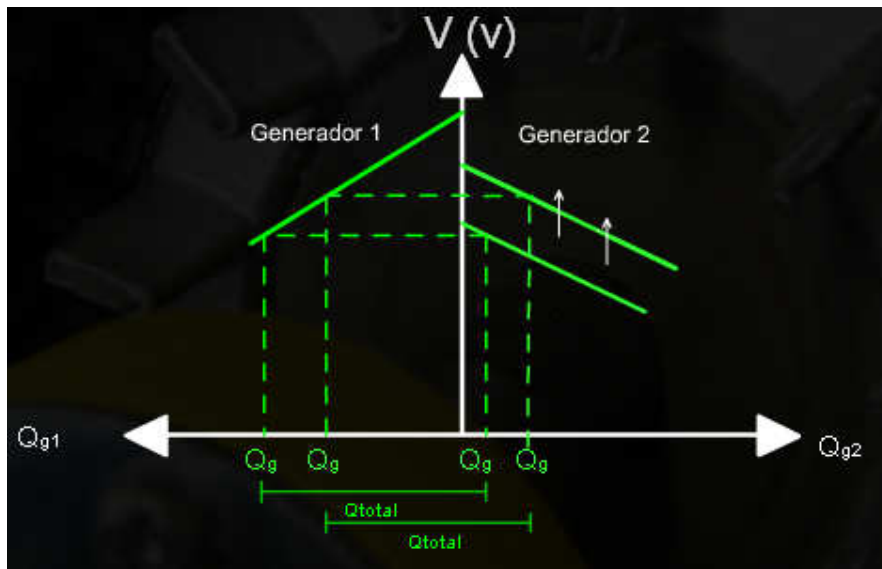
Cómo la potencia total suministrada a la carga no debe cambiar. A la frecuencia original f_1 , la potencia suministrada por G1 y G2 será mayor que la demandada por la carga, por lo que el sistema no puede continuar operando a la misma frecuencia que antes. De hecho, sólo hay una frecuencia a la que la suma de la potencia de salida de los dos generadores es igual a P_{carga} . Esa frecuencia f_2 es mayor que la frecuencia original de operación del sistema. A esa frecuencia, G2 suministra más potencia que antes y G1 suministra menos potencia que antes.

Por lo tanto, cuando dos generadores operan juntos, un incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos

1. Incrementa la frecuencia del sistema.
2. Incrementa la potencia suministrada por ese generador, a la vez que reduce la potencia suministrada por el otro.

¿Qué sucede si se incrementa la corriente de campo de G2? En la **Figura 64** se muestra el comportamiento resultante, que es análogo a la situación de potencia real.

Figura 64. Voltaje vs Potencia reactiva



Cuando dos generadores operan juntos y se incrementa la corriente de campo de G2,

1. Se incrementa el voltaje en los terminales del sistema.
2. Se incrementa la potencia reactiva Q suministrada por ese generador, a la vez que disminuye la potencia reactiva suministrada por el otro generador.

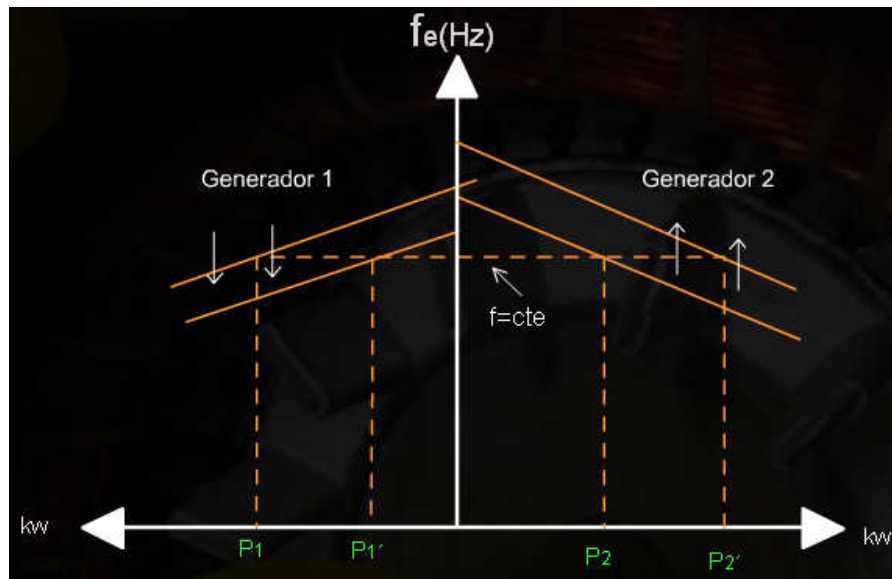
Si se conocen las pendientes y frecuencias en vacío de las curvas de caída de velocidad (frecuencia—potencia) del generador, entonces se pueden determinar cuantitativamente las potencias suministradas por cada generador y la frecuencia del sistema resultante.

Cuando dos generadores de tamaño similar operan en paralelo, el cambio en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos cambia tanto la frecuencia del sistema como la repartición de potencia entre ellos. Sería deseable ajustar sólo una de estas cantidades a la vez.

¿Cómo se puede ajustar la repartición de potencia del sistema de potencia independientemente de la frecuencia del sistema y viceversa?

El incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de un generador incrementa la potencia de la máquina y aumenta la frecuencia del sistema. La disminución en los puntos de ajuste del mecanismo regulador en el otro generador disminuye la potencia de la máquina y la frecuencia del sistema. Por lo tanto, para ajustar la repartición de potencia sin cambiar la frecuencia del sistema, se deben incrementar los puntos de ajuste del mecanismo regulador de un generador y simultáneamente disminuir los puntos de ajuste del mecanismo regulador del otro generador. De la **Figura 65** se obtiene:

Figura 65. Frecuencia vs Potencia

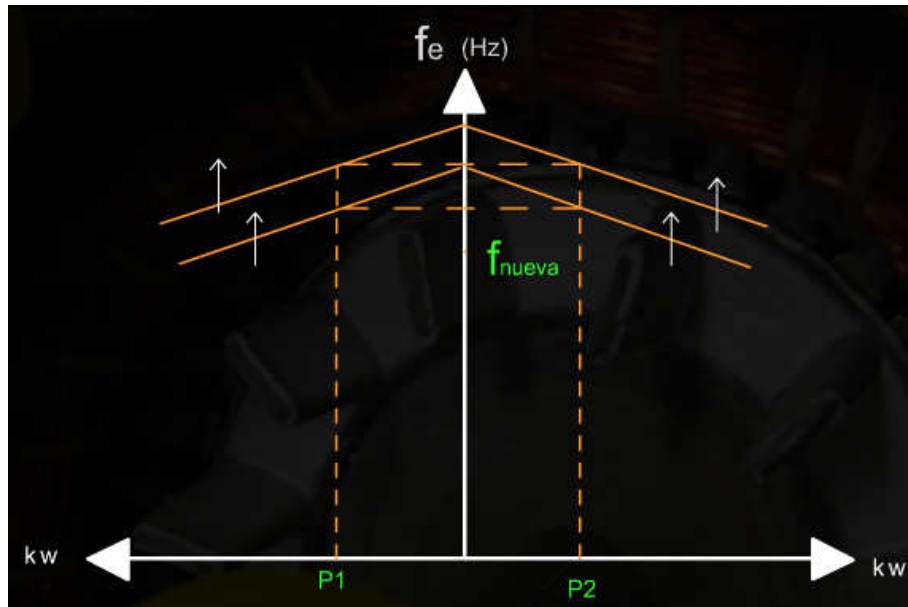


De manera similar, para ajustar la frecuencia del sistema sin cambiar la repartición de potencia, se deben incrementar o disminuir simultáneamente ambos puntos de ajuste del mecanismo regulador. Gráficamente se puede apreciar en la **Figura 66**.

Los ajustes a la potencia y voltaje en terminales funcionan de manera análoga. Para desplazar la repartición de la potencia reactiva sin cambiar el voltaje en terminales, se debe incrementar simultáneamente la corriente de campo de un generador y disminuir la corriente de campo en el otro. Para cambiar el voltaje en los terminales sin afectar la repartición de potencia reactiva se debe incrementar o disminuir simultáneamente ambas corrientes de campo. En resumen, en el caso de dos generadores que operan juntos:

1.El sistema está restringido a que la potencia total suministrada por los dos generadores juntos sea igual a la cantidad consumida por la carga. Ni la frecuencia del sistema ni el voltaje en terminales están restringidas a ser constantes.

Figura 66. Frecuencia vs Potencia



2. Para ajustar la repartición de potencia real entre los generadores sin cambiar la frecuencia del sistema, se deben incrementar simultáneamente los puntos de ajuste del mecanismo regulador en un generador al mismo tiempo que se disminuyen los puntos de ajuste del mecanismo regulador del otro generador. La máquina cuyos puntos de ajuste del mecanismo regulador se incrementan alimentará más carga.

3. Para ajustar la frecuencia del sistema sin cambiar la repartición de la potencia real, se deben incrementar o disminuir simultáneamente los puntos de ajuste del mecanismo regulador de los generadores.

4. Para ajustar la repartición de potencia reactiva entre generadores sin cambiar el voltaje en terminales, se debe incrementar de manera simultánea la corriente de campo de un generador a la vez que se disminuye la corriente de campo en el otro. La máquina cuya corriente de campo se incrementa alimentará más carga.

5. Para ajustar el voltaje en terminales sin cambiar la repartición de potencia reactiva, se deben incrementar o disminuir de manera simultánea las corrientes de campo de ambos generadores.

Es muy importante que cualquier generador síncrono que se pretenda usar en paralelo con otras máquinas tenga una característica de frecuencia—potencia descendente. Si dos generadores tienen una característica plana o casi plana, entonces la repartición de potencia entre ellos puede variar ampliamente con los más mínimos cambios en la velocidad en vacío. Para asegurar un buen control de la repartición de potencia entre generadores, éstos deben tener caídas de velocidad dentro de un intervalo de 2 a 5%.

5.9 ECUACIONES UTILIZADAS EN EL USO DE GENERADORES SÍNCRONOS EN PARALELO

$$n_{sinc} = 120 f / P$$

; n_{sinc} : velocidad de sincronismo

; f : frecuencia eléctrica

; P : número de polos

$$T_{sinc} = (P\phi) * (60) / (2 * \pi * n_{sinc})$$

; T_{sinc} : par de sincronización

$$P_{ent} = T_{ind} \omega_m$$

; P_{ent} : Potencia de entrada

$$P = S_p (f_{sc} - f_{sis})$$

; P : potencia de salida del generador

$$\%Reg \ n_m = ((n_{sc} - n_{pc}) / n_{pc}) * 100$$

; $\%Reg \ n_m$: regulación de velocidad en %

6. MANEJO LIBRO INTERACTIVO

6.1 DESCRIPCIÓN DEL LIBRO INTERACTIVO

6.1.1 Según los contenidos Se centra en la teoría de máquinas síncronas, el cual es un tema dictado en la asignatura máquinas eléctricas en la Universidad Tecnológica de Pereira.

6.1.2 Según los destinatarios Está diseñado específicamente para estudiantes de la asignatura máquinas eléctricas del programa de Tecnología Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, quienes requieren un conocimiento básico en la materia.

6.1.3 Según su estructura Es una aplicación de tipo multimedia ya que integra recursos gráficos y teóricos que conllevan a un aprendizaje coherente, secuencial, y estructurado según la temática perteneciente a máquinas síncronas. Opera bajo un escenario web, en donde se accede a diferentes tipos de aplicaciones, en donde se encuentra la plataforma principal del libro interactivo, en conjunto de bases de datos que son reflejados en archivos pdfs, direcciones web ,y un buscador web como complemento.

6.1.4 Según su base de datos Es de tipo cerrado, se recomienda no modificar la base de datos, ya que cualquier modificación puede causar daños que impiden la operación normal de la aplicación.

6.1.5 Según los medios que integra Es una aplicación gráfica multimedia.

6.1.6 Según los objetivos educativos que pretende facilitar Esta plataforma maneja elementos conceptuales, donde se proporciona la información teórica necesaria para un óptimo aprendizaje; es procedimental ya que el estudiante está interactuando según la información por medio de animaciones y gráficos; es actitudinal, ya que renueva la visión de una clase magistral convencional integrándole un nuevo elemento como lo es el libro interactivo.

6.1.7 según las actividades cognitivas que activa Observación ya que contiene gran cantidad de imágenes que le proveen de información, de allí parten también los procesos de memorización en tanto a lo visual. Evocación ya que algunos conceptos

esenciales son retomados en diversas ocasiones a medida que se va avanzando en los temas; la comprensión es otro de los procesos facilitados por el libro interactivo.

6.1.8 Según su comportamiento El libro interactivo es de tipo herramienta; tanto para el maestro en su proceso de enseñanza como para el estudiante en su proceso de aprendizaje.

6.1.9 Según su diseño Está centrado en mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje, proporcionando nuevas alternativas de búsqueda y consulta de información.

6.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS

Procesador de 512 MHz o superior.

Memoria RAM 256 MB o superior

Monitor con resolución mínima de 1024 x 768 píxeles o superior.

Espacio en disco duro necesario para ejecutar es de 150 MB.

Unidad de lectora CD room.

Para algunas alternativas de consulta es necesaria conexión directa a Internet, sin embargo la aplicación básica se puede ejecutar sin conexión a la red, pero es necesario tener instalado en su PC un navegador (recomendado MOZILLA FIREFOX); así mismo es necesaria la previa instalación del programa de visualización denominado ADOBE FLASH PLAYER, los cuales se pueden descargar gratuitamente a través de sus respectivas páginas en internet, o en la carpeta de instaladores del paquete libro interactivo.

6.3 MODO DE EMPLEO

INICIO:

Inserte el disco, en este se reproducirá automáticamente; en caso de no ser así vaya al icono: *Mi PC* o en otros sistemas operativos *EQUIPO*. A continuación abra el archivo denominado *libro interactivo*. Esta aplicación requiere para su visualización, tener instalado un navegador de Internet además de un proyector de imágenes ADOBE FLASH PLAYER; en caso de no tenerlos, estos se encuentran en la carpeta *instaladores* en sus versiones estándar; desde allí podrán ser instalados y posteriormente actualizados si se cuenta con una conexión internet. Una vez instalados los programas necesarios, se puede abrir el contenido del libro interactivo, en el ícono denominado *libro interactivo* en versión HTML.

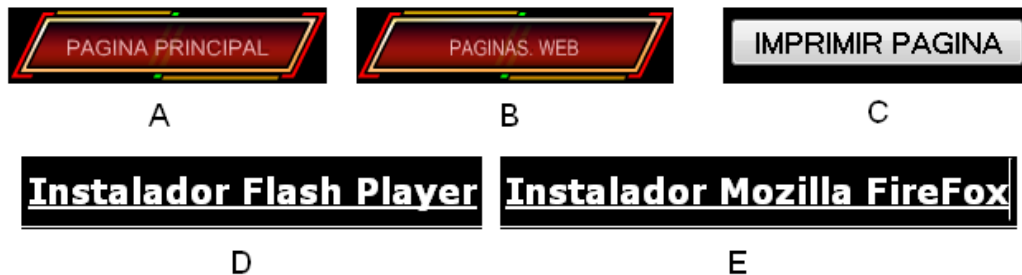
Una vez ubicados en la página de entrada. Se visualizará la siguiente pantalla:

Figura 67. Página de entrada



Como se puede observar esta primera página contiene 5 enlaces, que tienen las siguientes aplicaciones:

Figura 68. Primeros enlaces



- A.** Pagina principal: botón de enlace a la página principal en donde se encuentra el libro interactivo.
- B.** Paginas web: botón de enlace a página cuyo contenido son vínculos a diferentes páginas web externas, para consulta.
- C.** Imprimir página: permite imprimir la página de entrada.
- D.** Instalador Flash Player: vínculo de enlace directo al instalador Adobe Flash Player.
- E.** Instalador Mozilla FireFox: vínculo de enlace directo al instalador del navegador web Mozilla FireFox recomendado para correr la aplicación.

Al escoger la opción *página principal* se visualizará la siguiente pantalla:

Figura 69. Página principal



En esta nueva pantalla se podrán observar 3 campos, que contienen enlaces y aplicaciones las cuales poseen las siguientes características:

Campo #1:

Figura 70. Campo #1



En este campo se encuentran 3 grupos de enlaces que contienen información en formato .PDF; cuyo contenido son los capítulos mostrados en la aplicación libro interactivo, a demás, de poder acceder a un buen numero de ejercicios propuestos como resueltos y a un instalador PDF.

Campo #2:

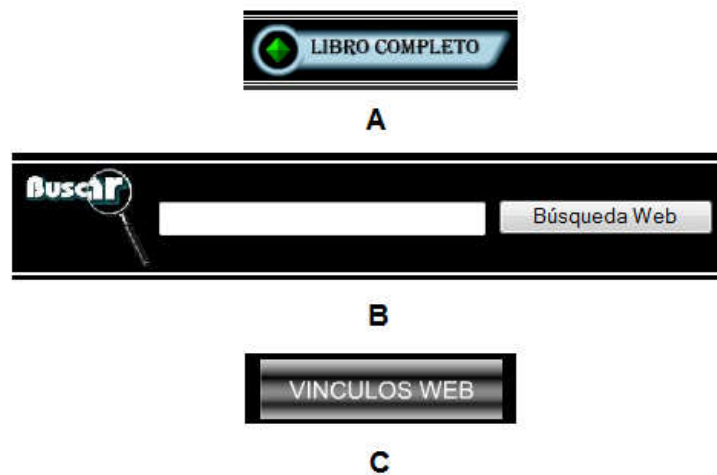
Figura 71. Campo #2



En este campo se encuentran enlaces que permiten aplicaciones como un collage de imágenes, además de vistas directas de imágenes interactivas que son mostradas en la aplicación libro interactivo.

Campo #3:

Figura 72. Campo #3



A. Libro completo: Enlace que permite acceder a la plantilla principal del libro interactivo, visualizándolo de manera mas completa. Este contiene todos los capítulos de manera interactiva.

Figura 73. Plantilla principal



B. Búsqueda web: Enlace compuesto por un navegador web, permitiendo mediante un acceso directo a la plataforma de búsqueda google, consultar una gran diversidad de información contenida en páginas web (es necesario poseer conexión a la red).

C. Vínculos web: Enlace que permite visualizar una página web en donde se encuentra una base de datos la que comprende un listado de vínculos a aplicaciones con contenido de máquinas previamente seleccionadas y calificadas para agilizar la búsqueda del usuario.

Figura 74. Página con base de datos

[illegible]

Otros botones:

Figura 75. Otros botones.



PAG. PRINCIPAL: Permite regresar a la página principal.

ANTERIOR: Permite regresar al fotograma anterior de la aplicación libro interactivo.

SIGUIENTE: Permite avanzar al siguiente fotograma de la aplicación libro interactivo.

INICIO: Regresa al inicio de la aplicación del libro interactivo.

CONCLUSION

Finalmente se concluye que el uso de un libro interactivo como una herramienta pedagógica puede facilitar y agilizar el proceso de aprendizaje y enseñanza del área de las maquinas síncronas. Así mismo se evidenció que el proceso de diseño no es complicado ya que los recursos necesarios para su implementación son mínimos si se hace una comparación costo beneficio.

El presente trabajo permitirá abrir gran cantidad de alternativas para futuros trabajos de grado, utilizando la interactividad como una gran herramienta tanto para enseñanza como para aprendizaje.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACOSTA M, Alvaro, GRANADA G, David, LÓPEZ V, Ricardo. Impedancias de secuencia de la máquina síncrona. Pereira, 1979, 50 p. Trabajo de grado (Ingeniería Eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- [2] ORTIZ M, Gustavo Alberto, PIRAQUIVE M, José Fernando. Elementos de diseño de una máquina síncrona, Pereira, 1980, 337 p. Trabajo de grado (ingeniería Eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- [3] IRVING L, Kosow. Máquinas eléctricas y transformadores: construcción y devanados de las máquinas, funcionamiento en paralelo, motores síncronos. México: Reverté S.A, Octubre 2005. 727 p. ISBN 84-291-3045-4.
- [4] ORTEGA PLANA, Juan Maria, RAMIREZ VAZQUEZ, José. Máquinas de corriente alterna: máquinas eléctricas y síncronas. Cuarta Edición. Barcelona: CEAC S.A 1973. 686 p. ISBN 84-329-6003-9.
- [5] ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Curso de máquinas síncronas: la construcción de las máquinas síncronas, los devanados y el voltaje inducido en los generadores síncronos, el generador trifásico, el motor síncrono, operación en paralelo de generadores. Primera Edición. Mexico: Limusa S.A, 1983. 343 p. ISBN 968-18-1611-0.
- [6] J CHAPMAN, Stephen. Máquinas eléctricas: introducción a los principios de las máquinas, generadores síncronos, motores síncronos. Cuarta edición. México, Mc Graw Hill, 2005. 746p. IISBN 970-10-4947-0.
- [7] A V, Konigslow. Teoría, cálculo y construcción de las máquinas de corriente alterna sincrónicas: teoría de las máquinas de corriente alterna sincrónicas, pruebas y ensayos de las máquinas sincrónicas, construcción y cálculo de las máquinas sincrónicas. Tercera Edición. Mexico: Labor S.A, 1961. 379p.
- [8] FERIER, Ricardo. Motores eléctricos. Quinta Edición. Artes gráficas Rafael Salva, 1966. 269p.
- [9] SUAREZ MOLANO, Alfonso, RODAS RENDON, Dario. Guías de laboratorio de máquinas eléctricas I. Universidad Tecnológica de Pereira. 67p.
- [10] S. SISKIND, Charles. Electrical machines: synchronous motors, alternating generators Second edition. Mc Graw Hill. 563p.
- [11] W. GINGRICH, Harold. Maquinas eléctricas transformadores y controles: máquinas pilifásicas sincrónicas. Prentice/hall internacional, 1979. ISBN 0-13-555979-0.
- [12] RODAS RENDON, Dario. Máquinas DC y síncronas. Libro. Universidad tecnológica de Pereira. 380p.
- [13] http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_s%C3%ADncrona
- [14] http://www.escet.urjc.es/~fisica/Docencia/IQ/presentacion_sincrono.pdf

- [15] http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2003/llor/12Capitulo2_Modela_de_la_Maquina_Sincrona.pdf
- [16] <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/itiei/mqe/apuntes/TME4.pdf>
- [17] <http://webpages.ull.es/users/mmateo/electrotecnia/2007-08/TEMA8.pdf>
- [18] <http://www.todoexpertos.com/categorias/ciencias-e-ingenieria/ingenieria-electrica/respuestas/1738187/maquinas-sincronas-y-asincronas>
- [19] <http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm>
- [20] <http://www.tuveras.com/motorsincrono/motorsincrono.htm>
- [21] <http://www.telefonica.net/web2/tecnocosas/recursos/motores.htm>
- [22] <http://triton.javeriana.edu.co/carrera/tgrado/2001-2/motores.pdf>
- [23] http://www.walter-fendt.de/ph11s/generator_s.htm
- [24] <http://www.electricidadbasica.net/ca1.htm>
- [25] <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/genpoles.htm>
- [26] <http://www2.schneiderelectric.es/productos.asp?idEmpresa=3>